DALL'AUTORE
DELL'*ENIGMA DEI NUMERI PRIMI*

MARCUS DU SAUTOY

CIÒ CHE NON POSSIAMO SAPERE

AVVENTURE AI LIMITI DELLA CONOSCENZA

Rizzoli

Esistono limiti alla conoscenza umana? In un'epoca in cui la scienza sembra darci accesso ai misteri più profondi del mondo fisico, rimane qualcosa che non arriveremo mai a comprendere? In questo suo nuovo saggio Marcus du Sautoy esplora sette confini dello scibile per trovare una risposta a tali interrogativi. Riusciremo mai a stabilire che cos'è la coscienza, a svelare la natura del tempo, ad afferrare i paradossi della meccanica quantistica, a districarci nei meandri della teoria del caos, a scoprire quale destino attende l'universo, a capire se l'infinito è un'entità reale o solo un concetto astratto?

Con la chiarezza espositiva e l'arguzia consuete, du Sautoy ci accompagna in un fantastico viaggio di esplorazione dell'ignoto. Ogni tappa comincia da un oggetto semplice – un dado da gioco, un violoncello, un orologio da polso, un piccolo campione di uranio-238 acquistato su internet, un modellino in cartone dell'universo, un'applicazione per smartphone, un bigliettino natalizio – per condurci alle frontiere della ricerca attuale, dove le domande più profonde ci costringono a ragionare non solo di scienza ma anche dell'esistenza di Dio; e a scoprire insieme all'autore che probabilmente non arriveremo mai a conoscere ogni cosa, ma che è proprio questa corsa senza fine verso un traguardo irraggiungibile a dare sempre nuova linfa alla ricerca scientifica e ad alimentare la nostra sete di conoscenza.

MARCUS DU SAUTOY è professore di matematica presso l'Università di Oxford. Divulgatore apprezzato in tutto il mondo, da tre anni è subentrato a Richard Dawkins nella carica di Simonyi Professor for the Public Understanding of Science. È autore del bestseller internazionale *L'enigma dei numeri primi* e di altri saggi matematici di grande successo, tutti pubblicati in Italia da Rizzoli.

Marcus du Sautoy

Ciò che non possiamo sapere

Avventure ai limiti della conoscenza

Traduzione di Carlo Capararo e Daniele Didero

Rizzoli

Proprietà letteraria riservata
© 2016 by Marcus du Sautoy
All rights reserved
© 2016 Rizzoli Libri S.p.A./Rizzoli, Milano
eISBN 978-88-58-68596-9
Titolo originale dell'opera:
WHAT WE CANNOT KNOW
Prima edizione: settembre 2016
Realizzazione editoriale: Studio Dispari – Milano
Art Director: Francesca Leoneschi
Graphic Designer: Mauro De Toffol / *the*World*of*DOT
www.rizzoli.eu
Quest'opera è protetta dalla Legge sul diritto d'autore.
È vietata ogni duplicazione, anche parziale, non autorizzata.

Ai miei genitori che hanno dato inizio al mio viaggio ai confini della conoscenza.

Confine zero: le incognite note

«Tutti gli uomini sono protesi per natura alla conoscenza.»

ARISTOTELE, *Metafisica*[1]

La scienza impera.

Ogni settimana leggiamo titoli che annunciano ulteriori passi avanti nella comprensione dell'universo, nuove tecnologie che trasformeranno il nostro ambiente, nuovi progressi medici che ci allungheranno la vita. Oggi la scienza ci offre la possibilità di sondare alcune delle grandi domande che rappresentano una sfida per l'umanità fin da quando siamo stati in grado di formularle. Da dove veniamo? Qual è il destino finale dell'universo? Quali sono gli elementi costitutivi del mondo fisico? Come fa un insieme di cellule ad acquistare coscienza?

Soltanto negli ultimi dieci anni abbiamo fatto atterrare una sonda spaziale su una cometa, costruito robot in grado di creare un proprio linguaggio, usato cellule staminali per riparare il pancreas di malati di diabete, scoperto come utilizzare la sola forza del pensiero per muovere un braccio robotico, sequenziato il DNA di una giovane cavernicola vissuta 50.000 anni fa. Le riviste scientifiche sono piene delle ultime grandi scoperte che emergono dai laboratori di tutto il mondo. Sappiamo così tanto. I progressi della scienza sono estremamente inebrianti.

La scienza ci ha fornito l'arma migliore di cui disponiamo nella nostra lotta contro il destino. Lungi dal capitolare ai danni prodotti dalle malattie e dai disastri naturali, la scienza

ha creato vaccini per combattere virus letali come quelli della poliomielite e persino di ebola. A fronte di una popolazione mondiale sempre più numerosa sono i progressi scientifici a darci le maggiori speranze di riuscire a sostentare i 9,6 miliardi di persone che presumibilmente vivranno sul pianeta nel 2050. È la scienza a metterci in guardia sull'impatto devastante che stiamo producendo sull'ambiente e a darci la possibilità di trovare soluzioni prima che sia troppo tardi. Fu probabilmente un asteroide a spazzare via i dinosauri dalla faccia della Terra, ma la scienza da noi sviluppata costituisce il miglior scudo di cui disponiamo contro futuri eventi di quel genere. Nella battaglia ininterrotta della razza umana contro la morte, la scienza è la nostra miglior alleata.

La scienza impera non solo quando si tratta della nostra lotta per la sopravvivenza, ma anche quando vogliamo migliorare la qualità della nostra vita. Siamo in grado di comunicare con gli amici e la famiglia attraverso distanze enormi. Abbiamo un accesso senza eguali a un database di conoscenze accumulate nel corso di generazioni di studi. Abbiamo creato mondi virtuali in cui possiamo rifugiarci nel tempo libero. Possiamo riprodurre le grandi esecuzioni delle opere di Mozart, Miles e dei Metallica nei nostri salotti premendo un bottone.

Il desiderio di conoscere è programmato nella psiche umana. I primi uomini assetati di conoscenza sono quelli che sono sopravvissuti, si sono adattati, hanno trasformato l'ambiente. Quanti non erano animati dalla stessa brama di sapere non ce l'hanno fatta. L'evoluzione ha privilegiato la mente che vuole conoscere i segreti del funzionamento dell'universo. La scarica di adrenalina che accompagna la scoperta di nuove conoscenze è il modo in cui la natura ci dice che il desiderio di sapere è importante quanto l'impulso a riprodursi. Come affermò Aristotele nell'incipit della *Metafisica*, comprendere il funzionamento del mondo è un bisogno umano primario.

Quel che è certo è che quand'ero uno scolaro la scienza mi spinse molto presto a gettarmi tra le sue braccia spalancate. Mi innamorai della sua capacità straordinariamente potente di svelarci tanto dell'universo. Le storie che i miei insegnanti di

scienze raccontavano sembravano persino più fantastiche dei romanzi che leggevo a casa. E mentre la scienza esercitava il suo incantesimo su di me, io consumavo ogni fonte di informazioni scientifiche su cui riuscivo a mettere le mani.

Convinsi i miei genitori a comprarmi un abbonamento a «New Scientist». Nella biblioteca locale divoravo «Scientific American». Monopolizzavo il televisore ogni settimana per vedere le puntate dei miei programmi scientifici preferiti: *Horizon* e *Tomorrow's World*. Mi affascinavano i programmi *Ascent of Man* di Bronowski, *Cosmo* di Carl Sagan e *The Body in Question* di Jonathan Miller. A Natale, le Christmas Lectures della Royal Institution fornivano un buon contorno di scienza per il tacchino che mangiavamo a pranzo. La mia calza per i regali era piena di libri di Gamow e di Feynman. Era un periodo elettrizzante: gli annunci di nuove conquiste si succedevano una settimana dopo l'altra.

Oltre a leggere queste storie sulla scoperta di cose note, iniziai a entusiasmarmi per i racconti dell'ignoto. Quello che già si sapeva apparteneva al passato mentre quello che ancora era sconosciuto rappresentava il futuro, il mio futuro. Sviluppai una vera ossessione per i libri di enigmi scritti da Martin Gardner che mi dava il mio professore di matematica. L'eccitazione di confrontarsi con un rompicapo e l'improvvisa scarica di euforia che mi attraversava quando lo risolvevo mi rese schiavo della droga della scoperta. Quegli enigmi costituirono la mia palestra per una sfida più impegnativa: affrontare questioni per le quali non esisteva una soluzione in fondo al libro. Sarebbero state le domande senza una risposta, i misteri matematici e gli enigmi scientifici ancora irrisolti il carburante della mia vita di scienziato.

Ciò che sappiamo

Se ripenso agli anni Settanta, quando andavo a scuola, e metto a confronto quello che sapevamo allora con quello che sappiamo oggi, trovo davvero straordinario quante cose in più abbiamo compreso sull'universo nel mezzo secolo in cui ho

vissuto. La tecnologia ha amplificato i nostri sensi, permettendoci di vedere cose delle quali gli scienziati che mi entusiasmavano quand'ero un ragazzino non avevano nemmeno idea.

La nuova gamma di telescopi hanno individuato pianeti simili alla Terra che potrebbero ospitare forme di vita intelligente. E hanno rivelato un fatto sorprendente, ovvero che l'espansione dell'universo ha cominciato ad accelerare quando esso è giunto a tre quarti della sua vita. Ricordo di aver letto da bambino che il nostro destino sarebbe stato un *big crunch*, un collasso dell'universo, ma adesso sembra che ci aspetti un futuro completamente diverso.

Gli acceleratori di particelle come il Large Hadron Collider del CERN (l'Organizzazione europea per la ricerca nucleare, con sede in Svizzera) ci hanno consentito di addentrarci nei meccanismi profondi che governano la materia stessa, rivelandoci l'esistenza di nuove particelle come il quark top, scoperto nel 1994, e del bosone di Higgs, scoperto nel 2012, che erano meri esercizi di matematica speculativa quando io leggevo «New Scientist» a scuola.

A partire dai primi anni Novanta, inoltre, la risonanza magnetica funzionale (fMRI) ci ha permesso di guardare all'interno del cervello e scoprire cose che negli anni Settanta, a dire il vero, non si riteneva nemmeno appartenessero all'ambito di ricerca degli scienziati. Il cervello era riserva di caccia per filosofi e teologi, ma oggi la tecnologia è in grado di rivelare quando state pensando a Jennifer Aniston e di predire che cosa state per fare ancor prima che voi stessi ve ne rendiate conto.

La biologia ha registrato un'esplosione di progressi. Nel 2003 è stata annunciata la mappatura di un'intera sequenza di DNA umano costituita da tre miliardi di lettere di codice genetico. Nel 2011 uno studio sulla rete neuronale del verme *C. elegans* ci ha fornito l'intero schema di connessioni dei 302 neuroni che ne costituiscono il sistema nervoso.

Anche la chimica ha conquistato nuovi territori. Nel 1985 è stata scoperta una forma totalmente sconosciuta di carbonio, i cui legami producono una struttura analoga a quella di un

pallone da calcio, e nel 2003 i chimici ci hanno sorpreso di nuovo creando i primi esemplari di grafene e mostrandoci così come il carbonio possa formare un reticolo di celle esagonali dello spessore di un solo atomo.

Inoltre, nel corso della mia vita sono stati risolti alcuni grandi enigmi della disciplina a cui avrei finito per dedicarmi, la matematica. È il caso dell'ultimo teorema di Fermat e della congettura di Poincaré, che avevano tenuto in scacco intere generazioni di matematici. Nuovi strumenti e intuizioni ci hanno schiuso percorsi nascosti per esplorare l'universo matematico.

Tenersi al passo con tutti questi nuovi progressi costituisce di per sé una sfida difficile, figuriamoci darvi il proprio contributo.

La cattedra in tuttologia

Qualche anno fa mi è stato assegnato un titolo professionale da aggiungere a quello di professore di ruolo in matematica presso l'Università di Oxford. È una qualifica che spesso mi fa sorridere: Simonyi Professor for the Public Understanding of Science. A quanto pare, la gente crede che io debba sapere tutto. Mi telefonano aspettandosi che io conosca le risposte a qualsiasi quesito scientifico. Poco dopo aver assunto quell'incarico, fu annunciato il Nobel per la medicina. Un giornalista mi chiamò sperando di ottenere una spiegazione sull'impresa che sarebbe stata premiata: la scoperta dei telomeri.

La biologia non è mai stata il mio forte, ma quando ricevetti quella telefonata ero seduto davanti al mio computer e devo ammettere con qualche imbarazzo che dopo una rapida scorsa alla pagina di Wikipedia procedetti a spiegare con autorevolezza al giornalista che si tratta di pezzetti di codice genetico posti alle estremità dei cromosomi la cui funzione, tra l'altro, è quella di controllare l'invecchiamento. La tecnologia che abbiamo a portata di polpastrelli ha accresciuto la nostra sensazione di poter conoscere tutto. Ci basta digitare una

domanda in un motore di ricerca e il computer sembra in grado di prevedere che cosa vogliamo sapere ancor prima che abbiamo finito di formulare la richiesta, e ci fornisce un elenco di siti in cui trovare la risposta.

La comprensione, tuttavia, è diversa dalla conoscenza di un elenco di fatti. Uno scienziato può sapere tutto? Sapere come si risolve un'equazione differenziale non lineare alle derivate parziali. Sapere come il gruppo di simmetria SU(3) governa le interazioni tra particelle elementari. Sapere come lo stato dell'universo tragga origine dall'inflazione cosmologica. Sapere come risolvere le equazioni einsteiniane della relatività generale o l'equazione d'onda di Schrödinger. Sapere come i neuroni e le sinapsi innescano il pensiero? Newton, Leibniz e Galileo furono probabilmente gli ultimi scienziati a sapere tutto ciò che era noto al loro tempo.

Devo ammettere che l'arroganza giovanile mi aveva indotto a credere di poter comprendere tutto quanto era noto. Se il cervello di un altro essere umano è riuscito a individuare il percorso che conduce a una nuova conoscenza, allora, considerato che il ragionamento seguito funziona per quel cervello, dovrebbe funzionare anche per il mio. Se disponessi di abbastanza tempo, pensavo, potrei decifrare i misteri della matematica e dell'universo, o quanto meno padroneggiare alla perfezione lo stato attuale delle conoscenze. Ma comincio sempre più a dubitare che le cose stiano così, a temere che qualcosa rimarrà sempre fuori della mia portata. Spesso il mio cervello fatica a orientarsi nella scienza che ci è già nota. Il tempo di cui dispongo per arrivare a sapere tutto si sta esaurendo.

La stessa ricerca matematica a cui mi dedico sta ormai oltrepassando i limiti di ciò che il mio cervello si sente in grado di comprendere. Da oltre dieci anni lavoro a una congettura che resiste con ostinazione ai miei tentativi concettuali di soluzione. Ma il mio nuovo ruolo di Professor for the Public Understanding of Science mi ha costretto a uscire dal terreno sicuro della matematica per riflettere sui concetti intricati delle neuroscienze, sulle idee sfuggenti della filosofia, sulle teorie prive di basi certe della fisica. Ho dovuto adottare un modo di pensare estraneo alla mia mentalità

matematica, correlata a certezze, dimostrazioni e precisione. I miei tentativi di capire tutto ciò che attualmente viene considerato conoscenza scientifica hanno rappresentato un test severo per i limiti della mia stessa capacità di comprensione.

Il processo di acquisizione di nuove conoscenze si basa necessariamente sull'opera di chi ci ha preceduto, sulla possibilità di issarci sulle spalle dei giganti, per citare una celebre frase che Newton scrisse a proposito dei risultati rivoluzionari da lui stesso ottenuti. E così il mio viaggio ai confini della conoscenza mi ha costretto a leggere come altri hanno formulato lo stato attuale delle cose, ad assistere a conferenze e seminari tenuti da chi si occupa dei campi che sto cercando di comprendere, a parlare con coloro che spostano più in là i confini, a indagare su storie contraddittorie, a consultare le prove e i dati riportati nelle riviste scientifiche e a volte persino ad andare a cercare un'idea su Wikipedia. Anche se insegniamo agli studenti a mettere in discussione qualsiasi informazione emerga da una ricerca su Google, alcuni studi hanno evidenziato che la trattazione di argomenti collocati all'estremità meno controversa dello spettro scientifico, come la teoria della relatività generale, su Wikipedia è dello stesso livello di quella rintracciabile nella letteratura scientifica. Su argomenti più dibattuti come i cambiamenti climatici, invece, i contenuti possono variare a seconda del giorno in cui si consulta la Rete.

Ciò solleva la questione del grado di attendibilità di ciascuna di queste versioni. Il semplice fatto che la comunità scientifica accetti una versione dei fatti come quella che al momento offre l'approssimazione migliore non significa che sia vera. La storia rivela di continuo che non è così, il che dovrebbe metterci in guardia sul fatto che le conoscenze scientifiche attuali sono provvisorie. Forse la matematica ha caratteristiche leggermente diverse, come spiegherò negli ultimi due capitoli del libro. La dimostrazione matematica offre infatti la possibilità di stabilire uno stato di conoscenza più durevole. Spesso citerò i risultati ottenuti da colleghi matematici, le cui dimostrazioni non sono state verificate da me. Farlo equivarrebbe a correre per rimanere nello stesso punto.

E per ogni scienziato la vera sfida non è rimanere all'interno del tranquillo giardino di ciò che è noto ma avventurarsi nelle distese selvagge dell'ignoto. E questa è la sfida al cuore di questo libro.

Quello che non sappiamo

A dispetto di tutti i progressi scientifici degli ultimi secoli, sono ancora tantissimi i misteri che attendono di essere risolti, le cose che non sappiamo. La consapevolezza di quanto ignoriamo sembra ampliarsi più rapidamente del catalogo delle nostre conquiste. Ciò che sappiamo di non sapere supera ciò che sappiamo di sapere. E sono proprio le cose che non conosciamo a costituire la forza propulsiva della scienza. Più che a riferire tutte le storie di cui già padroneggiamo la trama, uno scienziato è interessato a ciò che non è in grado di comprendere. Se la scienza è una disciplina viva, palpitante, è grazie a tutte le domande a cui non sappiamo rispondere.

Per esempio, la sostanza di cui è fatto il mondo fisico con il quale interagiamo sembra dare conto di appena il 4,9 per cento del contenuto totale di materia del nostro universo. In che cosa consiste allora il restante 95,1 per cento, ovvero ciò che chiamiamo materia o energia oscura? Se l'espansione dell'universo sta accelerando da dove proviene tutta l'energia che alimenta questa espansione?

Il nostro universo è infinito? Esiste un numero infinito di universi infiniti paralleli al nostro? E se questi infiniti universi esistono, hanno leggi fisiche diverse? Ci sono stati altri universi prima che il nostro nascesse dal Big Bang? E il tempo esisteva prima del Big Bang? Il tempo esiste o emerge come conseguenza di concetti più fondamentali?

Perché esiste un livello di particelle elementari insieme ad altre due copie quasi identiche di quel livello ma con masse crescenti, ovvero le cosiddette tre generazioni di particelle elementari? Esistono altre particelle che attendono di essere scoperte? Le particelle elementari sono in realtà minuscole stringhe che vibrano in uno spazio di undici dimensioni?

Come possiamo unificare la teoria della relatività generale, ovvero la fisica del molto grande, con la teoria dei quanti, ovvero la fisica del molto piccolo? Si tratta della ricerca di una teoria chiamata gravità quantistica, della quale abbiamo assoluto bisogno se vogliamo cercare di comprendere il Big Bang, quando l'universo era compresso nel dominio dei quanti.

E che dire della comprensione del corpo umano, un'entità così complessa da far apparire la fisica quantistica un esercizio per liceali? Stiamo ancora cercando di capire come funzionino le complesse interazioni tra espressione dei geni e ambiente. Riusciremo a trovare una cura per il cancro? È possibile sconfiggere l'invecchiamento? Qualcuno in vita oggi potrebbe raggiungere i mille anni d'età?

E l'origine dell'uomo? Considerato che l'evoluzione delle specie è un processo di mutazioni casuali, un differente lancio dei dadi evoluzionari produrrebbe ancora organismi dotati di occhi? Se riavvolgessimo il nastro dell'evoluzione e poi lo facessimo ripartire otterremmo forme di vita intelligente oppure la nostra specie è il risultato di un lancio fortunato dei dadi? Esiste vita intelligente altrove nell'universo? E che cosa possiamo dire della tecnologia che noi stessi creiamo? Potrà mai un computer arrivare ad avere una coscienza? E io sarò mai in grado di fare il download della mia coscienza in modo da poter sopravvivere alla morte del mio corpo?

Anche la matematica è ben lontana dall'essere stata completata. Contrariamente a quanto qualcuno crede, l'ultimo teorema di Fermat non era l'ultimo teorema. In matematica abbondano le cose che ancora non si sanno. C'è una regolarità nella successione dei numeri primi o la loro disposizione è totalmente causale? Saremo mai in grado di risolvere le equazioni matematiche che descrivono le turbolenze? Riusciremo mai a capire come fattorizzare in modo efficiente i grandi numeri?

Nonostante siano tante le cose che ancora non conosciamo, gli scienziati sono ottimisti e ritengono che queste domande non rimarranno per sempre senza una risposta. In effetti, gli ultimi decenni ci danno motivo di credere che ci troviamo in

un’epoca d’oro della scienza. Il ritmo con cui si susseguono le scoperte scientifiche sembra crescere in maniera esponenziale. Stando a quanto riportato nel 2014 dalla rivista «Nature», a partire dalla fine della Seconda guerra mondiale il numero di articoli scientifici pubblicati è raddoppiato ogni nove anni. Anche lo sviluppo dei computer segue un andamento esponenziale. La legge di Moore è la constatazione del fatto che la potenza d’elaborazione dei computer sembra raddoppiare ogni due anni. L’ingegnere Ray Kurzweil ritiene che lo stesso valga per il progresso tecnologico, che il ritmo dei cambiamenti tecnologici nei prossimi cent’anni sarà paragonabile a quello che l’umanità ha sperimentato negli ultimi 20.000 anni.

Ma è davvero possibile che le scoperte scientifiche mantengano tale crescita esponenziale? Kurzweil parla della Singolarità, un momento in cui l’intelligenza della nostra tecnologia supererà quella umana. Anche il progresso scientifico è destinato a incontrare la propria singolarità, un momento in cui sapremo tutto? Di sicuro prima o poi potremmo scoprire le equazioni fondamentali che spiegano come funziona l’universo. Scopriremo l’elenco definitivo delle particelle che costituiscono gli elementi di base dell’universo fisico e il modo in cui interagiscono tra loro. Alcuni scienziati pensano che l’attuale ritmo di crescita della scienza ci condurrà a un momento in cui potremmo scoprire una teoria del tutto, e le danno persino un nome: ToE, acronimo di *Theory of Everything*.

Nel suo *Dal Big Bang ai buchi neri* Hawking ha scritto: «Io credo nondimeno che ci siano motivi di cauto ottimismo per supporre che oggi si possa essere vicini alla fine della ricerca delle leggi ultime della natura». A quel punto «conosceremmo la mente di Dio», concludeva Hawking con un’affermazione provocatoria.

È possibile una cosa del genere? Conoscere tutto? Vorremmo conoscere tutto? La scienza si fossilizzerebbe. Gli scienziati hanno un rapporto stranamente schizofrenico con l’ignoto. Da un lato è ciò che non sappiamo ad attrarci e affascinarci, dall’altro è proprio trovare soluzioni e acquisire

conoscenze, rendere noto l'ignoto, a rappresentare il marchio di successo per uno scienziato.

Potrebbero esserci ricerche che non porteranno mai a una soluzione? Ci sono limiti a ciò che possiamo scoprire sul nostro universo fisico? Ci sono parti del futuro oltre i poteri predittivi della scienza e della matematica? Il tempo prima del Big Bang è un ambito d'indagine inaccessibile? Esistono concetti così complessi da essere fuori dalla portata delle possibilità di concepimento del nostro cervello finito? È possibile che il cervello umano indaghi su se stesso, oppure una tale analisi ci farebbe entrare in un circolo senza fine da cui non si può uscire? Ci sono congetture matematiche indimostrabili?

Quello che non sapremo mai

Quali sarebbero le conseguenze se esistessero davvero questioni scientifiche che non potranno mai essere risolte? Sembra un atteggiamento disfattista, se non addirittura pericoloso, ammettere che possano esistere siffatte questioni. Se l'ignoto costituisce la forza motrice della scienza, al contrario l'inconoscibile ne sarebbe la nemesi. Nella mia veste di membro a pieno titolo della comunità scientifica, nutro la speranza che alla fine saremo in grado di dare una risposta alle grandi questioni aperte. Pare dunque importante capire se l'esplorazione a cui ho deciso di partecipare si scontrerà con limiti oltre i quali non è possibile procedere. Con questioni che sono destinate a rimanere per sempre aperte.

Ecco qual è la sfida che mi sono posto in questo libro: capire se c'è qualcosa che per sua stessa natura non sapremo mai. Ci sono cose che rimarranno sempre oltre i limiti della nostra conoscenza? A dispetto del ritmo implacabile con cui i progressi della scienza si susseguono, esistono cose che nemmeno i più grandi scienziati raggiungeranno mai? Misteri destinati a resistere ai tentativi di sollevare i veli che limitano la nostra visuale sull'universo?

Naturalmente è molto rischioso, in qualsiasi momento della storia umana, tentare di definire Le Cose Che Non Possiamo Sapere. Come facciamo a prevedere quali nuove intuizioni trascineranno d'improvviso l'ignoto nell'ambito del conoscibile? Anche per questo risulta utile ripercorrere la storia del modo in cui siamo giunti alle conoscenze attuali, ci rivela infatti quante volte, credendo di aver incontrato una frontiera invalicabile, abbiamo scoperto un modo per oltrepassarla.

Pensate all'affermazione fatta dal filosofo francese Auguste Comte nel 1835 in riferimento alle stelle: «Non saremo mai in grado di studiare, in alcun modo, la loro composizione chimica e la loro struttura mineralogica». È un'affermazione del tutto ragionevole, dato che tali conoscenze sembravano dipendere dalla nostra possibilità di visitare una stella. Comte non aveva considerato che la stella può visitarci, o almeno che i fotoni di luce emessi dalla stella possono raggiungerci e rivelarci la sua composizione chimica.

Qualche decennio dopo la profezia di Comte, gli scienziati avevano determinato la composizione chimica del Sole analizzando lo spettro della luce emessa. «Se dovessimo andare sul Sole e prenderne alcuni campioni e analizzarli nei nostri laboratori,» dichiarò l'astronomo britannico Warren De la Rue «non potremmo studiarli con maggior precisione di quanto possiamo fare grazie a questo nuovo metodo di analisi spettrale.»

Quel metodo permise agli scienziati di determinare la composizione chimica di stelle che con ogni probabilità non visiteremo mai. Mentre la scienza dell'Ottocento ci faceva penetrare sempre più a fondo nei misteri dell'universo, cominciò a prendere corpo la sensazione che prima o poi avremmo ottenuto il quadro completo.

Nel 1900 Lord Kelvin, da molti considerato uno dei più grandi scienziati della sua epoca, giunse alla conclusione che quel momento fosse arrivato. «Ormai in fisica non c'è più nulla di nuovo da scoprire» dichiarò all'assemblea della British Association of Science. «Tutto ciò che rimane sono misure sempre più precise.» Anche il fisico americano Albert

Abraham Michelson pensava che il futuro della scienza si riducesse ad aggiungere alcune cifre decimali ai risultati già ottenuti. «Le più importanti leggi fondamentali e i fatti principali della scienza fisica sono stati tutti scoperti […]. Le nostre future scoperte andranno cercate alla sesta cifra decimale.»

Cinque anni più tardi, Einstein annunciava la sua nuova e straordinaria concezione dello spazio e del tempo, seguita a breve distanza dalle rivelazioni della fisica quantistica. Kelvin e Michelson non avrebbero potuto sbagliarsi di più riguardo a quanto rimanesse da scoprire nell'ambito della fisica.

Ciò che intendo tentare di stabilire è se esistano problemi che, a prescindere da ciò che di nuovo potremo comprendere, rimarranno sempre inaccessibili alla nostra conoscenza, e che sia possibile dimostrarlo. Forse non ne esistono. Come scienziato, è questa la mia speranza. Uno dei pericoli che si corrono confrontandosi con domande che al momento non hanno risposta è arrendersi troppo presto alla loro supposta inconoscibilità. Ma se ci sono domande senza risposta, quali conseguenze ne dobbiamo trarre? Significa che siamo liberi di scegliere tra le risposte possibili e che la nostra scelta non riveste alcuna reale importanza?

Parlare di ciò che sappiamo di non sapere non è prerogativa del mondo della scienza. Il politico statunitense Donald Rumsfeld si è avventurato nella filosofia della conoscenza con la seguente, famosa dichiarazione:

> Ci sono cose note che ci sono note; cose che sappiamo di sapere. Sappiamo anche che ci sono cose ignote che ci sono note; in altre parole, sappiamo che esistono alcune cose che non sappiamo. Ma ci sono anche cose ignote che ci sono ignote, cioè quelle che non sappiamo di non sapere.

Rumsfeld fu sommerso dalle critiche per questa risposta sibillina a una domanda postagli a bruciapelo durante un briefing al dipartimento della Difesa sulla mancanza di prove che collegassero il governo iracheno al possesso di armi di distruzione di massa. Per giornalisti e blogger fu una giornata memorabile e la vicenda culminò con l'assegnazione a Rumsfeld del premio Foot in Mouth da parte della Plain English Campaign. Eppure, se ci si prende la briga di analizzare la sua dichiarazione con cura, Rumsfeld riassume

con grande concisione diversi tipi di conoscenza, anche se forse dimentica una categoria importante: le cose note che ignoriamo. Le cose che sappiamo ma non osiamo ammettere di sapere. Come sostiene il filosofo Slavoj Žižek, queste sono probabilmente le più pericolose, soprattutto quando a possederle sono coloro che detengono il potere politico. Appartengono alla sfera delle illusioni. Dei pensieri repressi. Del subconscio freudiano.

Mi piacerebbe molto parlarvi delle cose ignote che ci sono ignote, ma allora sarebbero note! Nassim Taleb, autore del *Cigno nero*, ritiene che sia proprio il loro manifestarsi a produrre i maggiori cambiamenti nella società. Per Lord Kelvin furono la relatività e la fisica quantistica a rivelarsi cose ignote che non si conoscevano e che lui non era stato in grado di concepire. Perciò in questo libro posso al più cercare di parlare delle cose ignote che ci sono note e chiedermi se qualcuna di esse rimarrà ignota per sempre. Ci sono domande che per loro stessa natura resteranno sempre senza risposta, indipendentemente dai progressi della conoscenza?

Ho deciso di chiamare queste cose che non conosciamo Confini, dato che rappresentano l'orizzonte oltre cui non possiamo vedere. Nel mio viaggio ai Confini della conoscenza volto a enunciare le cose che sappiamo di non sapere passerò per le conoscenze acquisite che dimostrano quanto ci siamo spinti oltre quelli che in precedenza ritenevamo fossero i limiti della conoscenza. Il viaggio sarà anche un test delle mie capacità di acquisire conoscenze, dato che sta diventando sempre più difficile per uno scienziato conoscere persino ciò che è noto.

Se è vero che l'argomento del libro è ciò che non possiamo conoscere, altrettanto importante è comprendere ciò che conosciamo e come siamo arrivati a conoscerlo. Il mio viaggio ai limiti della conoscenza mi farà attraversare il territorio che gli scienziati hanno già mappato, fino a condurmi ai limiti estremi degli ultimissimi progressi compiuti. Durante il tragitto mi fermerò a meditare sui momenti nei quali gli scienziati pensavano di trovarsi di fronte a un muro che impediva ogni ulteriore progresso, per poi essere smentiti dalla generazione successiva che avrebbe trovato un modo per

procedere. Ciò ci offrirà una prospettiva importante sui problemi che oggi potremmo ritenere impenetrabili. Alla fine del viaggio, la mia speranza è che il libro fornirà una panoramica esaustiva su ciò che non possiamo sapere e anche sulle cose che sappiamo.

Per attraversare territori della scienza al di fuori della mia area di competenza specifica, mi sono affidato ad alcuni esperti che mi facciano da guida mentre mi avvicino a ciascuno dei Confini della scienza e che mi aiutino a verificare se sono i miei limiti, oppure dei limiti insiti nei problemi che affronto, a renderli impenetrabili.

Che cosa accade dunque se ci imbattiamo in una domanda a cui non è possibile rispondere? Come ci si pone di fronte all'impossibilità di sapere? Ho il coraggio di ammettere che alcune cose resteranno sempre fuori della mia portata? E come si pone la nostra specie di fronte all'impossibilità di sapere? È una sfida che ha prodotto alcune risposte interessanti da parte dell'uomo nel corso dei millenni, non da ultimo la creazione di un concetto chiamato Dio.

Trascendenza

C'è un altro motivo per il quale sono stato indotto a indagare l'inconoscibile, sempre legato al mio nuovo incarico. Il titolare precedente della cattedra per la Public Understanding of Science era un certo Richard Dawkins. Quando gli subentrai, mi preparai a sostenere l'assalto delle domande che mi sarebbero state fatte, non relative alla scienza ma alla religione. Dopo la pubblicazione dell'*Illusione di Dio* e gli accesi dibattiti con i creazionisti, Dawkins aveva speso gli ultimi anni della sua carica a discutere di religione e di Dio.

Era perciò inevitabile che la gente manifestasse interesse per la mia posizione al riguardo. La mia prima reazione fu di frapporre una certa distanza tra me e il dibattito su Dio. Il mio compito era quello di pubblicizzare il progresso scientifico e di coinvolgere il pubblico. Ero impaziente di riportare la

discussione dalle questioni sulla religione a quelle sulla scienza.

La mia strategia per sottrarmi a quel tipo di domande era ammettere di essere effettivamente un uomo di fede. Prima che i giornalisti si eccitassero troppo, mi affrettavo a spiegare che la mia religione è l'Arsenal. Il mio tempio è l'Emirates Stadium (un tempo era lo Highbury), nei quartieri settentrionali di Londra, e ogni santa domenica venero i miei idoli e intono loro inni. E all'inizio di ogni stagione riaffermo la mia fede nel fatto che questo sarà l'anno in cui vinceremo finalmente un trofeo. In un ambiente urbano qual è Londra, il calcio ha assunto il ruolo sociale che un tempo aveva la religione: unire una comunità attorno a dei riti.

Nel mio caso, la scienza che ho iniziato a studiare da adolescente è stato uno strumento di grande efficacia per eliminare qualsiasi pensiero vagamente religioso avuto da bambino. Cantavo nel coro della mia chiesa, e ciò mi espose alle idee che la religione cristiana aveva da offrire per la comprensione dell'universo. L'educazione scolastica in Gran Bretagna negli anni Settanta era infusa di blande connotazioni religiose: nelle assemblee si eseguiva l'inno anglicano *All Things Bright and Beautiful* e si recitava il padrenostro. La religione mi veniva propinata in una forma troppo semplicistica per sopravvivere alle storie raffinate e potenti che avrei appreso nei laboratori di scienze al liceo. Ben presto la religione uscì dalla mia vita. La scienza… e il football calcio… erano molto più affascinanti.

È chiaro che una risposta tanto irriverente non bastava per liquidare le domande sulla mia posizione religiosa. Ricordo che durante un'intervista radiofonica alla BBC dell'Irlanda del Nord, una domenica mattina, finii per essere pian piano trascinato a ragionare sulla questione dell'esistenza di Dio. Immagino che avrei dovuto cogliere i segnali di pericolo. Di domenica mattina, Dio non è lontano dai pensieri di molti radioascoltatori in Irlanda del Nord.

Nella mia attività di matematico, spesso affronto il problema di dimostrare l'esistenza di nuove strutture o viceversa di trovare argomentazioni a riprova che tali strutture

non possono esistere. La grande capacità del linguaggio matematico di produrre argomentazioni logiche ha indotto filosofi di ogni epoca a ricorrervi come metodo per provare l'esistenza di Dio. Io, tuttavia, ho sempre avuto problemi con questo approccio. In matematica, se si vuole dimostrare l'esistenza o meno di qualcosa è necessario averne una definizione molto chiara.

Così, dopo alcune sue domande incalzanti riguardo all'esistenza di Dio, spinsi l'intervistatore a cercare di definire che cosa significasse Dio per lui, in modo da poter ricorrere alla mia mente matematica. «È qualcosa che trascende la comprensione umana.» Bella scappatoia, pensai: ha appena definito Dio come qualcosa che per sua stessa natura io non posso arrivare a comprendere. Poi però cominciai a trovarla una definizione affascinate. Forse non una scappatoia, tutto sommato.

E se *definissimo* Dio come ciò che non possiamo conoscere? In molte civiltà antiche gli dèi erano sempre un simbolo delle cose che non si era in grado di spiegare o di comprendere. I nostri antenati trovavano le eruzioni vulcaniche o le eclissi così misteriose da trasformarle in atti divini. Quando la scienza ha fornito una spiegazione di quei fenomeni, quegli dèi si sono ritirati.

Questa definizione ricorda una divinità chiamata comunemente il «Dio dei vuoti». L'espressione veniva utilizzata con sprezzo da alcuni intellettuali credenti quando si rendevano conto che le dimensioni di quel Dio si stavano via via riducendo di fronte all'offensiva della scienza, e lanciavano un appello perché si rigettasse un Dio di quel genere. L'espressione «Dio dei vuoti» fu coniata dal matematico oxoniano nonché figura di spicco della Chiesa metodista Charles Coulson, quando affermò: «Non c'è alcun "Dio dei vuoti" per occupare quei punti strategici in cui la scienza fallisce».

Essa si associa anche a un'argomentazione fallace a favore dell'esistenza di Dio, a cui Richard Dawkins dedica qualche pagina per bocciarla nell'*Illusione di Dio*: se ci sono cose che non possiamo spiegare o conoscere, allora deve esserci un Dio

all’opera per riempire quel vuoto. Tuttavia, il mio interesse non è tanto nell’esistenza di un Dio che riempia il vuoto, quanto piuttosto nell’equiparazione di Dio all’idea astratta delle cose che non possiamo conoscere. Non le cose che al momento non sappiamo, ma quelle che per loro natura non potremo mai sapere, che rimarranno per sempre trascendenti.

La religione è qualcosa di più complesso del semplice stereotipo che spesso la società moderna ce ne offre. Per molte civiltà antiche dell’India, della Cina e del Medioriente, la religione non si identificava con la venerazione di un’Intelligenza soprannaturale, ma proprio con il tentativo di cogliere i limiti della nostra comprensione e del nostro linguaggio. Come ha affermato il teologo Herbert McCabe, «rivendicare l’esistenza di Dio significa sostenere che c’è una domanda senza risposta sull’universo». La scienza ha esercitato una grande pressione su quei limiti. Rimangono ancora domande a cui non si può rispondere? C’è qualcosa che è destinato a restare sempre oltre i limiti? Esiste il Dio di McCabe?

È questa la ricerca che sta al centro del mio libro. Possiamo identificare questioni o fenomeni fisici che rimarranno per sempre inaccessibili alla conoscenza? E se siamo in grado di farlo, allora di che genere di Dio stiamo parlando? Quali effetti avrebbe una simile idea di Dio? Le cose che non possiamo conoscere potrebbero agire nel nostro mondo e avere effetti sul nostro futuro? Meritano di essere venerate?

Prima, tuttavia, dobbiamo capire se ci siano effettivamente domande sull’universo destinate a restare senza risposta. Esiste davvero qualcosa che non possiamo arrivare a conoscere?

Primo Confine: il dado da casinò

1

> «L'imprevedibile e il predeterminato finiscono per rivelare le cose così come sono. È così che la natura concepisce se stessa, in tutte le scale, dal fiocco di neve alla bufera. Come sarebbe bello tornare ai primordi e non sapere niente.»
>
> TOM STOPPARD, *Arcadia*[1]

C'è un dado rosso posato sulla mia scrivania. Lo presi durante un viaggio a Las Vegas. Me ne innamorai quando lo vidi sul tavolo del craps. Era realizzato in maniera così perfetta, gli spigoli assolutamente precisi che convergevano in un punto ai vertici del cubo, le facce così lisce che era impossibile capire al tatto quale numero fosse rappresentato su ciascuna. I puntini vengono incisi sulla superficie del dado e poi riempiti di una vernice che ha la stessa densità del materiale plastico usato per realizzarlo. Ciò garantisce che la faccia su cui è segnato il numero sei non sia minimamente più leggera della faccia opposta, su cui c'è un unico puntino. La sensazione che si prova tenendo il dado in mano è incredibilmente appagante. È un oggetto bellissimo.

Eppure lo odio.

Al momento ci sono tre puntini rivolti verso di me. Ma se raccolgo il dado e lo lascio cadere dalla mia mano, non ho modo di sapere come atterrerà. Il dado è il simbolo ultimo dell'inconoscibile. A quanto pare è possibile conoscerne il futuro solo quando diventa il suo passato.

Mi hanno sempre procurato un estremo turbamento le cose che non posso conoscere o arrivare a capire. Non m'infastidisce il fatto di non sapere qualcosa, a patto che esista un modo per calcolarlo e abbastanza tempo per farlo. Il dado è davvero così inconoscibile? Oppure, se dispongo di informazioni sufficienti,

posso effettivamente dedurre la sua prossima mossa? Di certo è questione di applicare le leggi della fisica adeguate e di risolvere le equazioni appropriate. È qualcosa che posso arrivare a conoscere.

La mia disciplina, la matematica, fu inventata per dare alle persone un'idea di ciò che la realtà ci riserva. Per guardare dentro il futuro. Per diventare padroni del destino, non suoi schiavi. Io sono convinto che l'universo funzioni in base a delle leggi. Se le comprendo, posso conoscere l'universo. La capacità di individuare andamenti regolari ha conferito alla specie umana un mezzo molto potente per assumere il controllo della realtà. Se esiste un andamento regolare, allora ho qualche possibilità di prevedere il futuro e di conoscere l'inconoscibile. La regolarità del movimento del Sole significa che posso essere certo del fatto che domani sorgerà o del fatto che dovrà sorgere per 28 giorni prima che la Luna torni a essere piena. È così che si è sviluppata la matematica. La matematica è la scienza delle regolarità. Essere in grado di individuare andamenti regolari è uno strumento efficacissimo nella lotta evolutiva per la sopravvivenza. Le grotte di Lascaux ci mostrano come il fatto di saper contare 13 quarti di Luna a partire dal primo sorgere delle Pleiadi in inverno ci porta a un periodo dell'anno in cui le giumente sono gravide e più facili da cacciare. Saper prevedere il futuro è la chiave per la sopravvivenza.

Ma ci sono cose che paiono non possedere alcun andamento regolare o le cui regolarità sono così complesse o nascoste da rimanere inaccessibili alle capacità conoscitive umane. Il singolo lancio di un dado non è come il sorgere del Sole. Sembra che non ci sia modo di sapere quale delle sue sei facce sarà rivolta in alto quando il piccolo cubo finalmente si fermerà. È per questo che fin dall'antichità il dado viene usato per comporre controversie, per giocare, per scommettere denaro.

Questo dado da gioco, questo bel cubo rosso dai puntini bianchi, è davvero un oggetto impenetrabile? Di certo non sono il primo ad avere un rapporto complicato con la sua dinamica.

Conoscere il volere degli dèi

Durante un recente viaggio in Israele, ho portato i miei figli agli scavi archeologici di Beit Guvrin. Nell'antichità era un insediamento così popolare che oggi nel sito si trovano più strati di città edificate una sopra l'altra. Sono tanto numerosi i reperti sepolti nel terreno che gli archeologi sono ben felici di arruolare dilettanti come me e i miei ragazzi per dare una mano con gli scavi, anche se nel processo qualche vaso finisce inevitabilmente in pezzi. Di sicuro abbiamo estratto dal terreno tantissimi frammenti di vasellame, ma tra gli oggetti che portavamo alla luce c'era anche un gran numero d'ossa di animali. Pensavamo fossero avanzi di pasti, ma la nostra guida ci spiegò che in realtà si trattava di forme primitive di dadi.

Gli scavi archeologici di insediamenti risalenti al Neolitico hanno rinvenuto una quantità spropositata di calcagni di pecora o di altri animali insieme alle ceramiche frantumate e le selci lavorate che si trovano di solito in siti un tempo abitati dall'uomo. Queste ossa non sono altro che gli antenati del mio dado da casinò. Quando le si lancia, le ossa atterrano su una delle loro quattro facce, su cui spesso sono incise lettere o numeri. Si ritiene che questi dadi primitivi non venissero utilizzati per giocare d'azzardo bensì per compiere divinazioni. E questo collegamento tra il lancio di un dado e il volere degli dèi è proseguito per secoli. Sapere in che modo il dado sarebbe atterrato trascendeva la comprensione umana; l'esito del lancio risiedeva nel grembo di Giove.

Col tempo, questi dadi assunsero un ruolo sempre più prosaico quale parte del nostro spazio ludico. Il primo dado di forma cubica simile a quello posato sulla mia scrivania fu rinvenuto nei pressi di Harappa, in quello che oggi è il Pakistan settentrionale, dove si sviluppò una delle più antiche civiltà del mondo, una civiltà che risale al III secolo a.C. Dadi piramidali a quattro facce risalenti allo stesso periodo compaiono in un gioco scoperto nella città di Ur, in Mesopotamia.

I romani e i greci erano fanatici giocatori di dadi, così come i soldati del Medioevo che tornarono dalle crociate portando con sé un nuovo gioco chiamato azzardo, un nome che deriva dal termine arabo usato per indicare un dado: *az-zahr*. Si trattava di una versione primitiva del craps, il gioco a cui stavo assistendo nel casinò di Las Vegas quando presi il mio dado.

Se si potesse prevedere l'esito dei lanci di dadi, nessuno dei giochi basati sul loro utilizzo si sarebbe mai affermato. L'eccitazione prodotta dal backgammon, dal gioco dell'azzardo o dal craps deriva proprio dal non sapere come atterreranno i dadi. Perciò è probabile che i giocatori non mi ringrazieranno mentre tento di prevedere l'esito dei lanci del mio dado.

Per molti secoli nessuno osò nemmeno immaginare che una simile impresa fosse possibile. Gli antichi greci, tra i primi a sviluppare la matematica come strumento per esplorare il proprio ambiente, di certo non avevano la minima idea di come si potesse affrontare un problema dinamico di questo tipo. La loro matematica era un mondo rigido, statico, di forme geometriche; una matematica che non permetteva loro di affrontare il problema di un dado rotolante. Erano in grado di produrre formule capaci di descrivere le caratteristiche geometriche del cubo, ma appena il dado cominciava a muoversi erano persi.

E se avessero condotto degli esperimenti? A causa del loro antiempirismo, agli antichi greci mancava la motivazione per analizzare i dati e approntare una scienza per predire l'esito dei lanci di un dado. Dopo tutto, il modo in cui il dado era appena atterrato non avrebbe avuto alcuna influenza sull'esito del lancio successivo. Era un evento casuale e per loro significava che era inconoscibile.

Secondo Aristotele gli eventi che avvengono nel mondo reale si suddividevano in tre categorie: gli «eventi certi» che accadono per necessità seguendo le leggi della natura, gli «eventi probabili» che accadono nella maggior parte dei casi ma per i quali ci possono essere alcune eccezioni e infine gli «eventi inconoscibili» che accadono per puro caso. Aristotele poneva senza alcun dubbio i dadi nella terza categoria.

Quando la teologia cristiana esercitò la propria influenza sulla filosofia, le cose peggiorarono. Dato che era nelle mani di Dio, l'esito del lancio di un dado non era qualcosa che gli uomini potessero aspirare a conoscere. Per citare sant'Agostino, «noi non neghiamo l'esistenza delle cause cosiddette fortuite […]; affermiamo che sono nascoste e le attribuiamo alla volontà del vero Dio».[2]

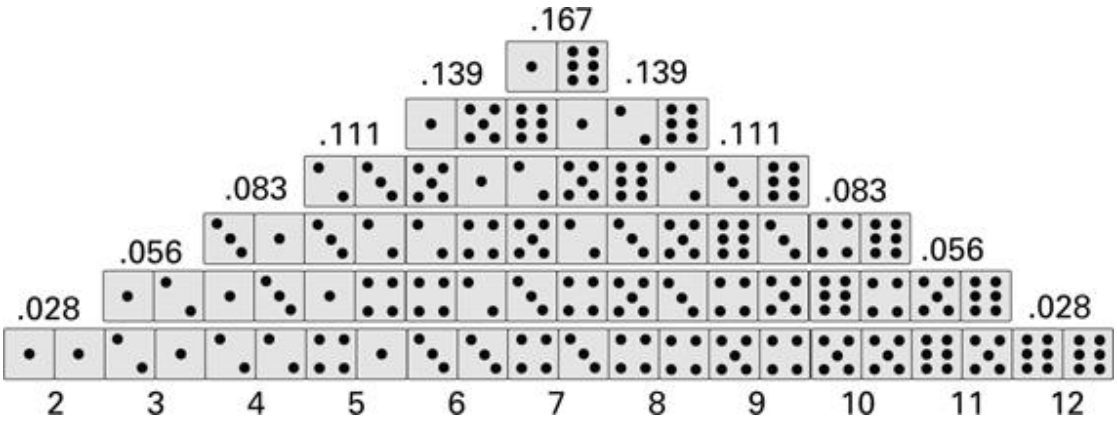
Non c'era alcuna casualità. Alcun libero arbitrio. L'inconoscibile era noto a Dio, il quale determinava l'esito del lancio del dado. Qualsiasi tentativo di predire quell'esito era l'opera di un eretico, che osava pensare di poter conoscere la mente divina. Re Luigi XI di Francia arrivò a proibire la costruzione dei dadi, poiché riteneva che i giochi di fortuna fossero empi. Ma alla fine i dadi come quello che tengo sulla scrivania cominciarono a rivelare i propri segreti. Si dovette aspettare il Cinquecento prima che fossero strappati alle mani di Dio e il loro destino fosse posto nelle mani, e nella mente, degli uomini.

Trovare i numeri nei dadi

Ho posato altri due dadi accanto a quello bellissimo di Las Vegas. Mi chiedo: se lancio tutti e tre i dadi, farei meglio a scommettere che l'esito sarà 9 oppure 10? Prima del XVI secolo non c'erano strumenti per rispondere a questa domanda. Tuttavia, chiunque avesse giocato abbastanza a lungo sapeva che se avessi lanciato due dadi soltanto sarebbe stato saggio scommettere sul 9 piuttosto che sul 10. Dopo non molto tempo, l'esperienza gli avrebbe detto che il 9 esce in media un terzo delle volte più spesso del 10. Con tre dadi è però più difficile farsi un'idea di come scommettere sull'esito di un lancio, visto che il 9 e il 10 sembrano uscire con la stessa frequenza. Me è proprio così?

Fu in Italia all'inizio del Cinquecento che un giocatore inveterato di nome Girolamo Cardano si rese conto per la prima volta dell'esistenza di andamenti regolari di cui ci si poteva servire quando si scommetteva sul lancio di un dado. Non erano regolarità sfruttabili nel caso di un singolo lancio. Emergevano invece sul lungo periodo, e dunque potevano essere usate a proprio vantaggio da un giocatore come Cardano, che dedicava molte ore a lanciare dadi. Era così ossessionato dalla ricerca di un modo per predire l'inconoscibile che una volta arrivò a vendere i beni della moglie per procurarsi il denaro da puntare al tavolo da gioco.

Cardano ebbe l'ingegnosa idea di contare quanti fossero i possibili futuri distinti dei dadi. Se io lancio due dadi, i possibili futuri distinti sono 36, come mostra il diagramma seguente:



A tre soltanto di questi futuri possibili corrisponde un totale di 10, mentre sono quattro quelli che danno come risultato 9. Cardano ne concluse che, nel caso del lancio di due dadi, valeva la pena di scommettere sul 9 piuttosto che sul 10. Questo fatto non gli tornava utile per una singola giocata, ma sul lungo periodo significava che, attenendosi al proprio calcolo, avrebbe finito per vincere. Purtroppo, pur essendo un matematico disciplinato, Cardano non lo era granché quando si sedeva al tavolo da gioco. Riuscì a perdere l'intero patrimonio ereditato dal padre, e quando i dadi non gli davano ragione finiva per fare a coltellate con i suoi avversari.

Nondimeno, era deciso ad azzeccare almeno una profezia. Sembra infatti che avesse previsto la data della propria morte: il 21 settembre 1576. Per essere certo di vincere quella scommessa, decise di porre fine alla propria vita quando il giorno fatidico arrivò. Per quanto io aneli alla conoscenza, ritengo che in questo caso ci si spinga un po' troppo in là. Sapere la data della propria morte è una cosa a cui la maggior parte delle persone preferirebbe rinunciare. Cardano, tuttavia, voleva vincere a ogni costo, anche quando giocava a dadi con la Morte.

Prima di uccidersi, elaborò quello che molti considerano il primo trattato in cui ci si addentra nella previsione del comportamento di un dado che rotola sul tavolo. Sebbene fosse stato scritto attorno al 1564, il suo *Liber de Ludo Aleae* non vide la luce fino al 1663, quando fu pubblicato.

Fu in effetti il grande Galileo Galilei ad applicare il ragionamento analitico descritto da Cardano per stabilire se

valesse la pena di scommettere su un punteggio di 9 oppure di 10 nel caso del lancio di tre dadi. I futuri distinti che i tre dadi possono avere, ragionò Galileo, sono 6 × 6 × 6 = 216. Di questi, 25 danno come risultato 9 e 27 danno come risultato 10. Non una grossa differenza, a dire il vero, né una differenza facile da cogliere utilizzando i dati empirici, ma sufficiente per permettere di ottenere un vantaggio sul lungo periodo scommettendo sul 10.

Un gioco interrotto

Il primato nello studio matematico dei dadi passò dall'Italia alla Francia attorno alla metà del Seicento, quando due pesi massimi della disciplina, Blaise Pascal e Pierre de Fermat, cominciarono ad applicare le proprie menti al problema di predire il futuro di quei cubi rotolanti. Pascal aveva cominciato a interessarsi al lancio dei dadi dopo aver conosciuto uno dei più grandi giocatori dell'epoca, Antoine Gombaud cavaliere di Méré. Gombaud aveva sfidato Pascal a risolvere una serie di scenari interessanti. Tra questi c'era il problema di cui Galileo era già venuto a capo, ma anche altri, come stabilire se sia consigliabile scommettere sull'uscita di almeno un 6 quando si lancia un dado quattro volte e quello oggi famoso detto dei «punti».

Nel tentativo di trovare soluzioni ai problemi posti dal cavaliere di Méré, Pascal iniziò una vivace corrispondenza con il grande matematico e magistrato Pierre de Fermat. Nel caso dei quattro lanci di un dado si sarebbero potuti considerare i 6 × 6 × 6 × 6 = 1296 possibili esiti distinti e contare in quanti di questi comparisse almeno un 6, ma si tratta di una procedura piuttosto farraginosa.

Pascal seguì un altro ragionamento. Le possibilità di non vedere comparire un 6 in un singolo lancio del dado sono 5 su 6, e siccome ciascun lancio è indipendente c'è un 5/6 × 5/6 × 5/6 × 5/6 = 48,2 per cento di possibilità di non vedere nemmeno un 6 in quattro lanci. Ma ciò equivale a dire che c'è un 51,8 per cento di possibilità di vedere almeno un 6 in quattro lanci, ovvero in poco più che nella metà dei casi. Dunque vale la pena di fare la puntata.

Il problema dei «punti» era ancora più difficile. Supponete che due giocatori – chiamiamoli Fermat e Pascal – stiano scommettendo sul lancio di un dado. Fermat ottiene un punto ogni volta che il lancio dà come esito 4 o più, mentre Pascal ottiene un punto nell'altro caso. Ciascuno di loro ha perciò 50 possibilità su 100 di guadagnare un punto a ogni lancio del dado. La posta è di 64 sterline, che andranno al primo giocatore che otterrà 3 punti. Tuttavia il gioco si interrompe, e non può più proseguire, quando Fermat si è aggiudicato 2 punti e Pascal 1. Come andrebbe divisa tra i due la posta di 64 sterline in questo caso?

I tentativi tradizionali di risolvere il problema si incentravano su ciò che avveniva prima dell'interruzione. Forse, considerato che ha vinto il doppio dei turni rispetto a Pascal, a Fermat dovrebbe andare una vincita doppia. Tuttavia questa conclusione non ha senso nel caso in cui, per esempio, Fermat abbia vinto solo un turno prima che la partita si interrompa. Pascal non riceverebbe nulla pur avendo ancora una possibilità di vincere la partita. Niccolò Fontana conosciuto come Tartaglia, contemporaneo di Cardano, dopo averci ragionato a lungo, giunse alla conclusione che il problema fosse irrisolvibile: «La risoluzione di tal questione è più presto giudiciale che per ragione, tal che in qual si voglia modo la farà risolta vi si trovarà da litigare».

Non tutti erano così pessimisti. Invece di guardare al passato, si poteva rivolgere l'attenzione a ciò che sarebbe potuto succedere nel futuro. A differenza che negli altri problemi, in questo caso non si trattava di predire l'esito del lancio dei dadi ma di immaginare tutti i possibili scenari futuri e di dividere la posta in base a quali di quelle versioni del futuro fossero favorevoli a ciascun giocatore.

Qui è facile lasciarsi ingannare. Gli scenari possibili sembrano tre. Fermat vince il turno seguente e intasca 64 sterline. Pascal vince il turno seguente e di conseguenza ci sarà un turno finale che si aggiudicherà Pascal oppure si aggiudicherà Fermat. Considerato che Fermat vince la partita in due di questi tre scenari, si direbbe che gli spettino due terzi della posta. È la trappola in cui cadde il cavaliere di Méré, come fece notare Pascal in una lettera a Fermat: «Il cavaliere di Méré è dotato di

una mente assai acuta ma non è un matematico; il che, come voi sapete, è un grosso difetto». Davvero un grosso difetto!

Pascal, che sul fronte matematico se la cavava invece egregiamente, sosteneva che la posta andasse divisa in maniera diversa. Le possibilità che Fermat vinca il turno successivo sono pari al 50 per cento, nel qual caso egli incasserà tutte le 64 le sterline. Ma se fosse Pascal a vincere quel turno, allora i due giocatori avrebbero le stesse chance di aggiudicarsi l'ultimo turno e perciò la posta andrebbe divisa in parti eguali: 32 sterline a testa. In entrambi i casi, a Fermat spettano comunque 32 sterline. Perciò le restanti 32 sterline dovrebbero essere divise in parti eguali, il che darebbe a Fermat un totale di 48 sterline.

Dalla sua residenza nei pressi di Tolosa, Fermat concordava con quell'analisi, tanto che Pascal gli scrisse: «Vedo che la verità è la stessa a Tolosa e a Parigi».

La scommessa di Pascal

L'analisi compiuta da Pascal e Fermat sul problema dei punti si potrebbe applicare a scenari molto più complessi. Lo stesso Pascal scoprì che il segreto per stabilire come dividere la posta è celato all'interno di un triangolo di numeri che oggi prende il suo nome.

1

1 1

1 2 1

1 3 3 1

1 4 6 4 1

1 5 10 10 5 1

Il triangolo di Pascal (o di Tartaglia) è costruito in modo tale per cui ogni numero che ne fa parte è uguale alla somma dei due numeri che gli stanno immediatamente sopra. I numeri che si ottengono in questo modo sono la chiave per dividere la posta in un qualsiasi gioco a punti interrotto. Per esempio, se Pascal ha bisogno di 2 punti per aggiudicarsi la partita, mentre Fermat ne

ha bisogno di 4, allora possiamo consultare la 2 + 4 = 6ª riga del triangolo e sommare i primi quattro numeri e poi gli ultimi due. In questo modo otteniamo la proporzione in base alla quale dividere il piatto. Nel nostro esempio la divisione sarà tra 1 + 5 + 10 + 10 = 26 e 1 + 5 = 6. Perciò Fermat dovrebbe ricevere 26/32 × 64 = 52 sterline e Pascal 6/32 × 64 = 12 sterline. In generale, la divisione della posta in una partita in cui Fermat ha bisogno di *n* punti per vincere e Pascal di *m* punti può essere decisa consultando la $(n + m)^{\text{sima}}$ riga del triangolo di Pascal.

A scoprire per primi il fatto che questo triangolo di numeri ha una relazione con i giochi di fortuna non furono i francesi. È assodato infatti che i cinesi li precedettero di qualche millennio. Per i cinesi, l'uso dei dadi e di altri metodi casuali come l'*I Ching* per tentare di predire il futuro era un'abitudine inveterata. Il testo dell'*I Ching* risale a circa 3000 anni fa e contiene esattamente la stessa tavola che Pascal realizzò per analizzare gli esiti del lancio di una moneta allo scopo di determinare la selezione causale di un esagramma di cui egli avrebbe analizzato a sua volta il significato. Oggi, tuttavia, la scoperta del triangolo è attribuita a Pascal (o a Tartaglia) invece che ai cinesi.

Pascal non si interessava soltanto ai dadi. Famosa è l'applicazione della sua nuova matematica della probabilità a una delle massime incognite: l'esistenza di Dio.

> «Dio esiste o no?» Ma da quale parte inclineremo? La ragione qui non può determinare nulla: c'è di mezzo un caos infinito. All'estremità di questa distanza infinita si gioca un gioco in cui uscirà testa o croce. […] Che cosa sceglierete, dunque? Poiché scegliere bisogna, esaminiamo quel che vi interessa meno. Avete due cose da perdere, il vero e il bene, e due cose da impegnare nel gioco: la vostra ragione e la vostra volontà, la vostra conoscenza e la vostra beatitudine; e la vostra natura ha da fuggire due cose: l'errore e l'infelicità. La vostra ragione non patisce maggior offesa da una scelta piuttosto che dall'altra, dacché bisogna necessariamente scegliere. […] Ma la vostra beatitudine? Pesiamo il guadagno e la perdita, nel caso che scommettiate in favore dell'esistenza di Dio. Valutiamo questi due casi: se vincete, guadagnate tutto; se perdete, non perdete nulla. Scommettete dunque, senza esitare, che Egli esiste.[3]

Nella scommessa che oggi prende il suo nome, Pascal sosteneva che la ricompensa sarebbe molto maggiore se si scegliesse di credere in Dio. La perdita è piccola se ci si sbaglia mentre il premio è la vita eterna se si ha ragione. D'altra parte, scommettere contro l'esistenza di Dio e perdere dà come risultato la dannazione eterna, mentre vincere fa guadagnare soltanto la conoscenza del fatto che Dio non esiste.

L’argomentazione cade in pezzi se la probabilità che Dio esista è uguale a zero, ma anche nel caso in cui non lo sia, è possibile che il costo della fede sia troppo elevato quando lo confronta con la probabilità dell’esistenza di Dio.

Le tecniche probabilistiche elaborate da matematici come Fermat e Pascal per affrontare l’incertezza erano incredibilmente potenti. Fenomeni in precedenza considerati inconoscibili, espressioni del volere divino, cominciavano a essere alla portata della mente umana. Oggi questi metodi probabilistici sono l’arma migliore di cui disponiamo per tentare di orientarci in ogni genere di fenomeno, dal comportamento delle particelle di un gas alle oscillazioni del mercato borsistico. Di fatto, la natura stessa della materia sembra essere alla mercé della matematica della probabilità, come scopriremo nel Terzo Confine, quando si applica la fisica dei quanti per predire che cosa faranno le particelle elementari mentre le osserviamo. Tuttavia, per chi è alla ricerca della certezza questi metodi probabilistici appaiono un compromesso frustrante.

Certo, mi rendo conto del grande progresso intellettuale compiuto da Fermat, Pascal e altri matematici, ma ciò non mi aiuta a sapere quanti puntini compariranno quando lancio il mio dado. Per quanto l’abbia studiata, la matematica della probabilità mi ha sempre lasciato un senso di insoddisfazione. C’è una sola cosa certa che un corso di probabilità ti inculca: per quante volte di fila io ottenga 6 lanciando il mio dado, ciò non ha alcuna influenza sull’esito del lancio successivo.

Esiste dunque un modo per sapere con certezza come atterrerà il mio dado? Oppure questa conoscenza è destinata a restare per sempre al di là della nostra portata? Stando alle rivelazioni di uno scienziato d’Oltremanica, un modo c’è.

La matematica della natura

Isaac Newton è il mio grande eroe nella lotta che ho intrapreso contro l’inconoscibile. L’idea che io possa arrivare a sapere tutto sull’universo trae origine dalla sua opera rivoluzionaria intitolata *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Pubblicato per la prima volta nel 1687, il libro è dedicato all’elaborazione di un

nuovo linguaggio matematico in grado di offrire gli strumenti per svelarci come funziona l'universo. Rappresentava un modello radicalmente nuovo del modo di fare scienza. L'opera «proiettò la luce della matematica su una scienza che fino ad allora era rimasta nell'oscurità delle congetture e delle ipotesi» dichiarò lo scienziato francese Alexis Clairaut nel 1747.

È anche un tentativo di unificazione, di creare una teoria che descriva il celeste e il terrestre, il grande e il piccolo. Keplero aveva concepito le leggi che descrivono i moti dei pianeti, elaborate per via empirica osservando i dati e tentando di trovare equazioni che vi si adattassero per creare il passato. Galileo aveva descritto la traiettoria del volo di una sfera nell'aria. Fu il genio di Newton a capire che si trattava di esempi di un unico fenomeno fisico: la gravità.

Nato il giorno di Natale del 1643 nel villaggio di Woolsthorpe, nel Lincolnshire, Newton cercò sempre di avere il controllo sul mondo fisico. Costruì orologi e meridiane, fabbricò mulini in miniatura azionati da topi, abbozzò innumerevoli progetti di edifici e navi e realizzò minuziose illustrazioni di animali. Un giorno il gatto di famiglia scomparve, a quanto pare portato via da una mongolfiera che Newton aveva costruito. Le sue pagelle scolastiche, tuttavia, non preannunciavano un futuro luminoso: lo descrivevano come «distratto e indolente».

Non necessariamente l'indolenza è un tratto negativo per un matematico. Può essere un potente incentivo a cercare scorciatoie ingegnose per risolvere un problema evitando di affidarsi a una procedura lunga e faticosa. Tuttavia è una qualità che in genere gli insegnanti non apprezzano.

In effetti Newton andava così male a scuola che sua madre la ritenne una perdita di tempo per cui il ragazzo avrebbe fatto meglio a imparare a gestire la fattoria di famiglia a Woolsthorpe. Purtroppo Newton si dimostrò altrettanto incapace di occuparsi dei beni famigliari e perciò fu rispedito a scuola. Per quanto l'aneddoto sia apocrifo, si dice che l'improvviso mutamento del suo rendimento scolastico coincise con un pugno alla testa assestatogli da un compagno prepotente. Che sia vero o meno, questa repentina trasformazione lo portò a eccellere, e culminò nel suo trasferimento a Cambridge, per studiare all'università.

Quando la peste bubbonica si propagò per l'Inghilterra nel 1665, l'Università di Cambridge fu chiusa per precauzione. Newton si ritirò nella casa di Woolsthorpe. L'isolamento è spesso un ingrediente importante per concepire nuove idee. Newton si rinchiuse nella sua camera a pensare.

> La verità è figlia del silenzio e della meditazione. Tengo costantemente l'argomento davanti a me e aspetto finché i primi bagliori non si trasformano piano, poco alla volta, in una luce piena e chiara.

Nell'isolamento del Lincolnshire, Newton creò un nuovo linguaggio in grado di catturare il problema di un mondo in continuo mutamento: il calcolo infinitesimale. Tale strumento matematico sarebbe stato la chiave per capire in anticipo il comportamento dell'universo. Ed è grazie a questo linguaggio che ho qualche speranza di arguire come potrebbe atterrare il mio dado.

Istantanee matematiche

Il calcolo infinitesimale è un tentativo di dare senso a quella che a prima vista sembra un'operazione matematica priva di significato: zero diviso zero. Quando lascio cadere dalla mano il mio dado, è questa l'operazione matematica da fare per tentare di determinare la sua velocità istantanea durante il tragitto nell'aria.

La velocità del dado aumenta costantemente mentre la gravità lo attira verso il basso. Come posso dunque calcolare il suo valore in ogni dato istante? Per esempio, quanto veloce sta cadendo il dado dopo un secondo? La velocità è uguale alla distanza percorsa divisa per il tempo trascorso. Perciò potrei misurare la distanza che il dado percorre nell'aria durante il secondo successivo per ottenere una velocità media relativa a quel lasso di tempo. Ma ciò che mi interessa è il valore esatto della velocità istantanea. Potrei misurare la distanza percorsa in un periodo di tempo più breve, come mezzo secondo o un quarto di secondo. Tanto minore è l'intervallo di tempo, quanto più preciso sarà il mio calcolo. Alla fine, per ottenere il valore esatto della velocità decido di considerare un intervallo di tempo infinitamente piccolo. Ma a questo punto mi trovo a dover calcolare quanto fa 0 diviso 0.

▶ *Il calcolo infinitesimale: dare un senso a zero diviso zero*

Supponiamo che un'automobile parta da ferma. Quando scatta il cronometro, il guidatore pigia l'acceleratore. Supponiamo di leggere sul cronometro che dopo t secondi l'automobilista ha percorso $t \times t$ metri. Qual è la velocità dell'auto dopo 10 secondi? Otteniamo un valore approssimato della velocità considerando quanta strada ha percorso l'auto nell'intervallo di tempo che va da 10 a 11 secondi. La velocità media durante questo secondo è $(11 \times 11 – 10 \times 10)/1 = 21$ metri al secondo.

Ma se consideriamo una finestra di tempo più breve, per esempio la velocità media relativa a 0,5 secondi, otteniamo:

$(10{,}5 \times 10{,}5) – 10 \times 10)/0{,}5 = 20{,}5$ metri al secondo.

Un valore leggermente inferiore, naturalmente, dato che l'auto sta accelerando e perciò la sua velocità media sarà maggiore nella seconda metà dell'undicesimo secondo. Adesso proviamo a considerare una finestra temporale ancora più ridotta. Dimezzandola di nuovo, otterremo:

$(10{,}25 \times 10{,}25) – 10 \times 10)/0{,}25 = 20{,}25$ metri al secondo.

Forse a questo punto il matematico che è in voi ha individuato lo schema. Se considero una finestra temporale di x secondi, la velocità media in quell'intervallo di tempo risulterà pari a $20 + x$ metri al secondo. Riducendo l'ampiezza degli intervalli temporali, la velocità si approssima sempre più al valore di 20 metri al secondo. Perciò, anche se sembra che per calcolare la velocità istantanea dell'auto dopo 10 secondi io debba stabilire quanto faccia 0/0, il calcolo infinitesimale dà un senso a ciò che una simile operazione dovrebbe significare. ◀

Il calcolo infinitesimale di Newton dà un senso all'operazione di dividere zero per zero. Newton comprese come sia possibile calcolare il valore a cui tende la velocità di un corpo quando si riducono sempre più le dimensioni dell'intervallo temporale considerato. Il suo era un linguaggio nuovo e rivoluzionario che riusciva a catturare un mondo dinamico e cangiante. La geometria degli antichi greci era perfetta per fornire un'immagine statica, immobile del mondo. Il grande progresso matematico compiuto da Newton fu creare il linguaggio atto a descrivere un mondo che non sta fermo. Se in precedenza la matematica descriveva una natura morta, ora poteva catturare un'immagine in movimento. Fu l'equivalente scientifico del modo in cui, nello stesso periodo, l'arte dinamica del Barocco proruppe dall'arte statica del Rinascimento.

In seguito, Newton giudicò quel periodo come uno dei più produttivi della sua vita definendolo *annus mirabilis*. «In quei giorni ero nel fiore dell'età creativa e attendevo alla Matematica e alla Filosofia più di quanto abbia mai fatto in seguito.»

Tutto attorno a noi è in uno stato di flusso, dunque non meraviglia affatto che questa matematica avrebbe assunto una

grandissima importanza. Ma per Newton il calcolo infinitesimale rappresentava uno strumento utile a raggiungere le conclusioni scientifiche riportate nei *Principia*, il grande trattato dato alle stampe nel 1687 in cui egli descrive le proprie idee sulla gravità e le leggi del moto.

Scrivendo in terza persona, Newton spiega che il suo calcolo infinitesimale rappresenta la chiave per raggiungere le scoperte scientifiche contenute nel testo: «Con l'aiuto di questa nuova analisi il signor Newton scoprì la maggior parte delle proposizioni dei suoi *Principia*». Di questa «nuova analisi», tuttavia, non furono pubblicati resoconti. Newton ne fece circolare privatamente i concetti tra i suoi amici, ma non provava alcun desiderio di diffonderli perché altri li comprendessero.

Per fortuna questo linguaggio è ora a disposizione di tutti e io stesso, quand'ero un apprendista matematico, ho dedicato molti anni a impararlo. Ma per tentare di svelare i segreti del mio dado avrò bisogno di combinare la rivoluzione matematica di Newton con il grande contributo che egli diede alla fisica: le famose leggi del moto con cui si aprono i suoi *Principia*.

Le regole del gioco

Nei *Principia* Newton illustra tre semplici leggi da cui deriva tanta parte della dinamica dell'universo.

Prima legge del moto di Newton: *Un corpo rimarrà in uno stato di riposo o di moto uniforme rettilineo a meno che non sia costretto a modificare quello stato da forze che agiscono su di esso*.

Questo fatto non era così ovvio a uomini del calibro di Aristotele. Se la fate rotolare lungo una superficie piana, una palla alla fine si ferma. Sembra che sia necessaria una forza per perpetuarne il movimento. C'è però una forza nascosta che modifica la velocità della palla: l'attrito. Se io lo lanciassi nello spazio vuoto e lontano da campi gravitazionali, il mio dado continuerebbe effettivamente a muoversi in linea retta a velocità costante.

Per modificare la velocità di un oggetto o la direzione del suo moto era dunque necessaria una forza. La seconda legge di Newton spiegava in che modo tale forza modifica il moto e richiedeva l'uso del nuovo strumento matematico da lui elaborato per esprimere il cambiamento. Il calcolo infinitesimale mi ha già permesso di affermare a quale velocità si muove il mio dado mentre accelera cadendo verso il tavolo. Il tasso a cui questa velocità cambia si ottiene grazie allo stesso strumento matematico.

La seconda legge del moto di Newton afferma che c'è un rapporto diretto tra la forza applicata e il tasso di cambiamento della velocità: *Il tasso di cambiamento del moto di un corpo, o accelerazione, è direttamente proporzionale alla forza che agisce su di esso e inversamente proporzionale alla sua massa.*

Per comprendere il moto di corpi come il mio dado che cade, devo comprendere quali sono le possibili forze che agiscono su quei corpi. La legge della gravitazione universale di Newton identifica una delle forze principali che fa sentire il proprio effetto sul movimento della sua famosa mela che cade dall'albero, per esempio, ma anche sui pianeti che si muovono nel sistema solare. La legge stabilisce che la forza esercitata su un corpo di massa m_1 da un altro corpo di massa m_2 posto a una distanza pari a r è uguale a

$$\frac{G \times m_1 \times m_2}{r^2}$$

dove G è una costante fisica empirica che determina l'intensità della forza di gravità nel nostro universo.

Grazie a queste leggi sono adesso in grado di descrivere la traiettoria di una palla in volo, o di un pianeta che si muove nel sistema solare, o del dado che lascio cadere dalla mia mano. Il problema successivo si presenta quando il dado colpisce il tavolo. Che cosa succede a quel punto? Newton formulò una terza legge che ci offre un indizio.

Terza legge del moto di Newton: *Quando un corpo esercita una forza su un altro corpo, quest'ultimo esercita simultaneamente su di esso una forza di uguale intensità nella direzione opposta*.

Lo stesso Newton si servì di queste leggi per dedurne una straordinaria serie di risultati relativi al sistema solare. «Ora dimostrerò la struttura del sistema del Mondo» scrisse. Per applicare le proprie idee alla traiettoria dei pianeti, per prima cosa ridusse ciascuno di essi a un punto coincidente con il suo baricentro e ipotizzò che l'intera massa del pianeta fosse concentrata in quel punto. Poi, utilizzando le sue leggi del moto e la sua nuova matematica, riuscì a dedurre le leggi formulate da Keplero sul movimento dei pianeti.

Fu anche in grado di calcolare il rapporto tra le masse dei pianeti maggiori, della Terra e del Sole e di spiegare alcune curiose irregolarità nel moto della Luna causate dall'attrazione del Sole. Giunse alla conclusione che la Terra non era una sfera perfetta, ma che sarebbe dovuta essere schiacciata ai poli a causa della sua rotazione e della conseguente forza centrifuga. I francesi pensavano che succedesse l'opposto, che la Terra fosse allungata nella direzione dei poli. Una spedizione intrapresa nel 1733 dimostrò che Newton aveva ragione e quale fosse la potenza della matematica.

La teoria newtoniana del tutto

Fu un'impresa straordinaria. Le tre leggi erano i semi dai quali sarebbe stato possibile, in linea di principio, dedurre il moto di tutte le particelle dell'universo. Meritava di ricevere il nome di Teoria del Tutto. Dico «semi» perché sarebbe stato necessario che altri scienziati coltivassero quelle leggi per poi applicarle a scenari più complessi rispetto al sistema solare newtoniano composto da masse puntiformi. Per esempio, nella loro forma originaria le leggi di Newton non sono adatte per descrivere il moto di corpi meno rigidi o di corpi che si deformano. Fu Leonardo Eulero, il grande matematico svizzero del Settecento, a ricavare alcune equazioni che generalizzavano le leggi di Newton. Le equazioni di Eulero potevano essere applicate anche allo studio di sistemi quali una corda vibrante o un pendolo oscillante.

Il numero delle equazioni cresceva di continuo, così come i fenomeni naturali da esse controllati. Eulero stesso concepì

quelle relative al moto dei fluidi non viscosi. All'inizio dell'Ottocento, il matematico francese Joseph Fourier scoprì le equazioni che descrivevano la conduzione termica. I suoi connazionali Pierre-Simon Laplace e Siméon-Denis Poisson utilizzarono le leggi di Newton per ottenere equazioni più generali sulla gravitazione, equazioni che controllavano fenomeni come l'idrodinamica e l'elettrostatica. Il comportamento dei fluidi viscosi fu descritto dalle equazioni di Navier-Stokes e l'elettromagnetismo dalle equazioni di Maxwell.

Con la scoperta del calcolo infinitesimale e delle leggi del moto, sembrava che Newton avesse ridotto l'universo a un congegno meccanico deterministico controllato da equazioni matematiche. Di fatto, gli scienziati erano convinti di aver scoperto la Teoria del Tutto. Nel suo *Saggio filosofico sulle probabilità*, pubblicato nel 1812, Pierre-Simon Laplace riassunse la fiducia di quasi tutti gli scienziati nella capacità straordinaria della matematica di svelare ogni aspetto dell'universo fisico.

> Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come l'effetto del suo passato e la causa del suo futuro. Un intelletto che in un determinato istante dovesse conoscere tutte le forze che mettono in moto la natura, e tutte le posizioni di tutti gli oggetti di cui la natura è composta, se questo intelletto fosse inoltre sufficientemente ampio da sottoporre questi dati ad analisi, esso racchiuderebbe in un'unica formula i movimenti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomi più piccoli; per un tale intelletto nulla sarebbe incerto e il futuro proprio come il passato sarebbe evidente davanti ai suoi occhi.

Nei secoli successivi alla grande opera di Newton la concezione secondo cui era possibile, almeno in teoria, conoscere passato e presente dell'universo divenne predominante tra gli scienziati. Sembrava che l'idea di un Dio che agiva nel mondo fosse stata completamente rimossa. Forse c'era un Dio responsabile di aver dato avvio al processo, ma da quel momento in poi erano state le equazioni della matematica e della fisica ad assumerne il controllo.

Che cosa possiamo dire dunque del mio umile dado? Davvero, disponendo delle leggi del moto, posso limitarmi a combinare la geometria del cubo con la direzione iniziale del movimento e le successive interazioni con il tavolo per predire l'esito del lancio? Ho scritto le equazioni sul mio blocco per appunti. Hanno un aspetto decisamente scoraggiante.

Anche Newton si occupò del problema di prevedere il comportamento dei dadi. Il suo interesse fu destato da una lettera che ricevette da Samuel Pepys. Pepys stava per fare una scommessa con un amico e voleva il consiglio di Newton su quale, fra tre opzioni, gli avrebbe dato le maggiori possibilità di vincere:

1) Lanciare sei dadi e ottenere almeno un 6
2) Lanciare dodici dadi e ottenere almeno due 6
3) Lanciare diciotto dadi e ottenere almeno tre 6.

Pepys avrebbe scommesso con l'amico 10 sterline, equivalenti a un migliaio di sterline odierne, e perciò era ansioso di ricevere un consiglio valido. L'intuito gli diceva che la terza opzione era la più favorevole, ma Newton gli rispose che la matematica suggeriva l'opposto. Avrebbe dovuto puntare il suo denaro sulla prima. Tuttavia Newton non si affidò alle leggi del moto e al calcolo infinitesimale per risolvere il problema, bensì alle idee sviluppate da Fermat e da Pascal.

Ma anche se Newton fosse stato in grado di risolvere le equazioni che ho scritto sul mio blocco per ricostruire la traiettoria del dado, in seguito sarebbe stata scoperta l'esistenza di un altro problema che potrebbe far naufragare ogni possibilità di conoscere il suo futuro. Sebbene Pascal si riferisse alla propria scommessa con Dio, nella sua analisi c'è una frase interessante, che sembra mettere il bastone tra le ruote a chi voglia conoscere il futuro: «La ragione qui non può determinare nulla: c'è di mezzo un caos infinito».

Il destino del sistema solare

Se Newton è il mio eroe, quando si tratta del mio impulso a prevedere il futuro il matematico francese Henri Poincaré dovrebbe essere il mio peggior nemico. Eppure non posso biasimarlo per aver scoperto quello che è uno dei colpi più devastanti mai assestati a chiunque voglia sapere che cosa accadrà in futuro. Lui stesso non fu molto entusiasta di quella scoperta, considerato che gli costò una bella somma di denaro.

Nato cent'anni dopo Laplace, Poincaré credeva come il suo connazionale in un universo meccanico, governato da leggi matematiche e totalmente prevedibile. «Se noi conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell'universo all'istante iniziale, potremmo predire esattamente la situazione di questo stesso universo in un istante successivo.»

Comprendere il mondo era la motivazione primaria che spingeva Poincaré a dedicarsi alla matematica. «I fatti matematici che vale la pena di studiare sono quelli che, in analogia ad altri fatti, sono in grado di portarci alla conoscenza di una legge fisica.»

Benché le leggi del moto di Newton avessero generato una miriade di equazioni matematiche atte a descrivere l'evoluzione del mondo fisico, risolverle rimaneva estremamente complicato nella maggior parte dei casi. Considerate le equazioni relative a un gas. Pensate al gas come a un insieme di molecole che sbattono qua e là quali minuscole palle da biliardo. In teoria, il comportamento futuro del gas era scritto nelle leggi newtoniane del moto, ma il mero numero delle sferette rendeva assolutamente impossibile trovare una qualunque soluzione esatta delle equazioni. I metodi statistici e probabilistici rimanevano di gran lunga il miglior strumento per comprendere il comportamento di miliardi di molecole.

C'era uno scenario in cui il numero di palle da biliardo era ragionevolmente piccolo e una soluzione appariva possibile: il sistema solare. Per Poincaré, il problema di predire quale destino attendesse i nostri pianeti mentre procedevano danzando verso il futuro divenne un'ossessione.

Siccome l'attrazione gravitazionale esercitata da un pianeta su un altro pianeta che si trova a una certa distanza dal primo è la stessa che si avrebbe se tutta la massa del pianeta fosse concentrata nel suo centro di gravità, per determinare il destino finale del sistema solare è possibile immaginare che i pianeti siano punti nello spazio, proprio come aveva fatto Newton. Ciò significa che l'evoluzione del sistema solare può essere descritta per mezzo di tre coordinate per ogni pianeta, che individuano la posizione del suo baricentro nello spazio, e di tre numeri che registrano la sua velocità in ognuna delle dimensioni spaziali. Le forze che agiscono sui pianeti sono le forze di attrazione

gravitazionale reciproca tra di essi. Se si dispone di tutte queste informazioni, basta applicare la seconda legge di Newton per tracciare il percorso dei pianeti nel futuro remoto.

L'unico problema è che la soluzione matematica delle equazioni coinvolte rimane estremamente complicata. Newton aveva risolto il caso di due pianeti (o di un pianeta e di un sole). I due corpi avrebbero seguito traiettorie ellittiche con un fuoco in comune che coincideva con il centro di gravità del sistema. Quest'orbita si sarebbe ripetuta periodicamente all'infinito. Tuttavia Newton si era bloccato quando aveva provato a introdurre un terzo pianeta. Cercare di calcolare il comportamento di un sistema solare costituito, per esempio, dal Sole, la Terra e la Luna sembrava piuttosto semplice, ma già in questo caso si ha a che fare con un'equazione di 18 variabili: 9 per le posizioni e 9 per le velocità dei tre corpi. Newton ammise che «considerare simultaneamente tutte queste cause di moto e definire questi moti per mezzo di leggi esatte che permettano calcoli fattibili eccede, se non sono in errore, la capacità di qualsiasi intelletto umano».

La ricerca di una soluzione ricevette un notevole impulso quando re Oscar II di Norvegia e Svezia decise di festeggiare il proprio compleanno offrendo un premio a chi avesse risolto un problema matematico. Non ci sono molti monarchi al mondo che sceglierebbero di celebrare il proprio compleanno con dei problemi di matematica, ma Oscar non aveva mai smesso di amare la disciplina fin da quando, studente all'Università di Uppsala, vi si era distinto.

> Sua Maestà Oscar II, desideroso di fornire una nuova prova del suo interesse per l'avanzamento delle scienze matematiche, ha deciso di accordare un premio, il giorno 21 gennaio 1889, a un'importante scoperta nel campo dell'analisi matematica superiore. Il premio consisterà in una medaglia d'oro della diciottesima misura recante l'effigie di sua Maestà e avente il valore di mille franchi, insieme con una somma di duemilacinquecento corone.

Tre eminenti matematici si riunirono per selezionare un certo numero di problemi idonei e per giudicare i lavori sottoposti dai candidati. Una delle questioni che posero fu quella di stabilire per via matematica se il sistema solare fosse stabile. I pianeti avrebbero continuato per sempre a ruotare intorno al Sole con la perfetta regolarità di un meccanismo d'orologio oppure c'era la possibilità che, in un momento imprecisato del futuro, la Terra se

ne andasse alla deriva nello spazio e sparisse dal nostro sistema solare?

Per rispondere alla domanda era necessario risolvere le equazioni davanti a cui Newton si era bloccato. Poincaré pensava di possedere le capacità per aggiudicarsi il premio. Uno dei trucchi a cui ricorrono spesso i matematici è quello di cimentarsi inizialmente con una versione semplificata del problema per verificare se sia possibile raggiungere una soluzione. Così Poincaré partì dal problema dei tre corpi. Ma poiché anch'esso risultava di gran lunga troppo complicato, decise di introdurre un'ulteriore semplificazione. Invece del Sole, della Terra e della Luna, perché non cercare di comprendere il caso di due pianeti e di un granello di polvere? La presenza del granello di polvere non avrebbe avuto alcun effetto sui due pianeti, e ciò gli permetteva di ipotizzare, grazie alla soluzione di Newton, che essi avrebbero continuato a percorrere le loro traiettorie ellittiche uno intorno all'altro. Il granello di polvere, d'altro canto, avrebbe avvertito la forza gravitazionale esercitata dai due pianeti. Poincaré si accinse perciò a tentare di descrivere la traiettoria seguita dal granello. Comprendere le caratteristiche di quella traiettoria avrebbe costituito un contributo interessante alla soluzione.

Anche se Poincaré non riuscì a risolvere completamente il problema, la memoria che presentò era di una qualità più che sufficiente per garantirgli il premio offerto da re Oscar. Era riuscito a dimostrare l'esistenza di un'interessante classe di orbite che si ripetevano, le cosiddette orbite periodiche. Per loro stessa natura tali orbite erano stabili, dato che si ripetevano di continuo, proprio come le ellissi che due pianeti devono inesorabilmente percorrere quando ruotano uno intorno all'altro.

Le autorità francesi furono entusiaste del fatto che il premio fosse andato a un connazionale. Nell'Ottocento la Germania aveva loro sottratto il primato nel campo della matematica, perciò gli accademici di Francia salutarono con entusiasmo la vittoria di Poincaré come una prova della rinascita della matematica nazionale. Gaston Darboux, segretario permanente dell'Académie des sciences, dichiarò:

> Da quel momento in poi il nome di Henri Poincaré è diventato noto al pubblico, che si è abituato a considerare il nostro collega non più come un matematico

particolarmente promettente, ma come un grande accademico di cui la Francia ha il diritto di essere orgogliosa.

Un piccolo errore con grandi conseguenze

Iniziarono i preparativi per la pubblicazione della soluzione di Poincaré in un'edizione speciale di «Acta Mathematica», la rivista dell'Accademia reale svedese delle scienze. Poi giunse il momento che ogni matematico teme. Il peggior incubo di ogni matematico. Poincaré pensava che il suo lavoro fosse inattaccabile. Aveva controllato ogni passaggio della dimostrazione. Poco prima che l'articolo fosse pubblicato, tuttavia, uno dei redattori della rivista sollevò un dubbio su uno dei passaggi della sua argomentazione matematica.

Poincaré aveva supposto che un piccolo cambiamento nelle posizioni dei pianeti, un piccolo arrotondamento per eccesso o per difetto qua e là, fosse accettabile, dato che avrebbe prodotto cambiamenti altrettanto piccoli nelle orbite previste. Sembrava un assunto ragionevole. Ma Poincaré non aveva fornito alcuna giustificazione del fatto che le cose stessero effettivamente così. E in una dimostrazione matematica ogni passaggio, ogni assunto, deve essere corroborato da una logica rigorosa.

Il redattore scrisse a Poincaré per chiedergli chiarificazioni su quella lacuna nella dimostrazione. Ma quando Poincaré si mise all'opera per giustificare la validità del proprio assunto, si rese conto di aver commesso un grave errore. Scrisse a Gösta Mittag-Leffler, presidente della giuria del premio, nella speranza di limitare i danni per la propria reputazione:

> Le conseguenze di questo errore sono più serie di quanto pensassi all'inizio. Non vi nasconderò il dolore che questa scoperta mi ha provocato. […] Non so se riteniate ancora che i risultati che restano meritino il grande riconoscimento che avete attribuito loro. (In ogni caso, non posso fare altro che confessare il mio imbarazzo a un amico leale quale voi siete.) Vi scriverò più diffusamente quando sarò in grado di vedere le cose con maggior chiarezza.

Mittag-Leffler decise che era suo dovere informare gli altri componenti della giuria:

> La memoria di Poincaré è di una profondità e di una creatività tanto rare che senza alcun dubbio aprirà una nuova era scientifica per quanto riguarda l'analisi matematica e le sue conseguenze per l'astronomia. Pur tuttavia, saranno

necessarie spiegazioni molto più estese e al momento sto chiedendo all'illustre autore di illuminarmi su diversi punti importanti.

Mentre cercava di trovare una via d'uscita, Poincaré si rese presto conto di essersi semplicemente sbagliato. Anche un piccolo cambiamento nelle condizioni iniziali poteva produrre orbite totalmente differenti. Introdurre le approssimazioni che aveva proposto non era possibile. Il suo assunto era errato.

Telegrafò a Mittag-Leffler per comunicargli la cattiva notizia e cercare di impedire che la memoria andasse in stampa. Imbarazzato, scrisse:

Può succedere che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne producano di molto grandi nei fenomeni finali. Un piccolo errore nelle prime produrrà un errore gigantesco nei secondi. Fare predizioni diventa impossibile.

Mittag-Leffler si disse «estremamente sconcertato» nel ricevere quella notizia.

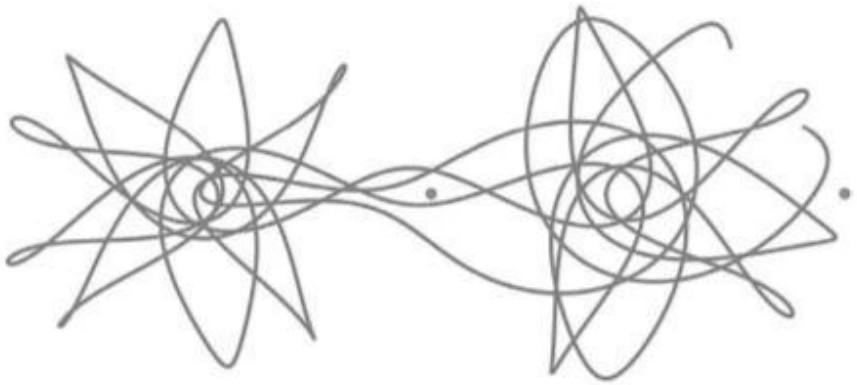
Non che io dubiti del fatto che la vostra memoria sarà comunque considerata l'opera di un genio dalla maggioranza dei matematici e che costituirà il punto di partenza per tutte le imprese future nell'ambito della meccanica celeste. Perciò non pensate che io rimpianga di avervi assegnato il premio […] Ma ecco la parte peggiore. La vostra lettera è arrivata troppo tardi e la memoria è già stata distribuita.

Mittag-Leffler rischiava di giocarsi la reputazione per non aver individuato l'errore prima che il premio fosse assegnato pubblicamente a Poincaré. Non era certo quello il modo di festeggiare il compleanno del suo re! «Vi prego di non far parola con nessuno di questa deplorabile vicenda. Vi darò i dettagli domani.»

Nelle settimane successive ci si dedicò a cercare di recuperare le copie già stampate senza suscitare sospetti. Mittag-Leffler suggerì a Poincaré di pagare la stampa della versione originale della memoria. Poincaré, che si sentiva mortificato, accettò, anche se il conto assommava a oltre 3500 corone, 1000 in più rispetto al premio da lui vinto.

Nel tentativo di porre rimedio alla situazione, Poincaré si mise all'opera per tentare di chiarire il proprio errore, di comprendere dove e perché l'aveva commesso. Nel 1890 scrisse una seconda memoria ampliata in cui spiegava le ragioni per le quali riteneva che piccoli cambiamenti potessero portare un sistema apparentemente stabile ad andare in pezzi.

Ciò che Poincaré scoprì grazie al proprio errore portò alla formulazione di uno dei concetti matematici più importanti del secolo scorso: il concetto di caos. La sua scoperta pone limiti enormi a ciò che noi uomini possiamo sapere. Posso anche aver scritto tutte le equazioni relative al moto del mio dado, ma se poi il dado si comporta come i pianeti del sistema solare? Stando a ciò che Poincaré scoprì, se compio anche un solo piccolo errore nel registrare la posizione iniziale del dado, quell'errore potrebbe espandersi fino a produrre una grande differenza nell'esito del lancio quando il dado si fermerà sul tavolo. Il futuro del mio dado da gioco si cela dunque dietro la matematica del caos?



La traiettoria caotica tracciata da un singolo pianeta che orbita attorno a due Soli.

2

«Se la natura non fosse bella, non varrebbe la pena di conoscerla, né varrebbe la pena di vivere la nostra vita.»

HENRI POINCARÉ[1]

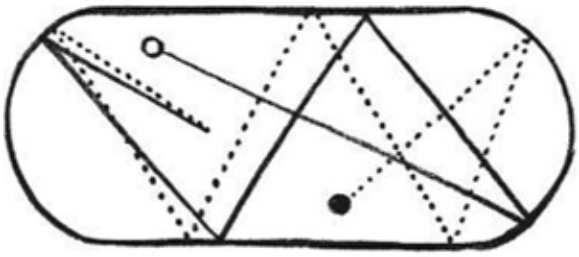
Ai tempi in cui frequentavo l'università sprecavo un sacco di tempo giocando a biliardo nella sala di ritrovo degli studenti. Avrei potuto giustificarmi fingendo che facesse parte delle mie ricerche su angoli e via discorrendo, ma la verità è che rimandavo. Era un buon metodo per non confrontarmi subito con il fatto di non riuscire a risolvere i problemi assegnati per quella settimana. In realtà il tavolo da biliardo cela nelle sue sponde molta matematica interessante. Ed è una matematica di grande rilevanza per il mio desiderio di comprendere il dado da gioco che tengo sulla scrivania.

Se lancio una pallina su un tavolo da biliardo e segno il suo percorso, poi ne lancio un'altra quasi esattamente nella stessa direzione, la seconda pallina percorrerà una traiettoria molto simile a quella seguita dalla prima. Poincaré aveva supposto che il medesimo principio valesse per il sistema solare.

Lanciamo un pianeta in una direzione leggermente diversa e il sistema solare si evolverà seguendo uno schema molto simile. È ciò che l'intuito suggerisce alla maggior parte delle persone: se introduco un piccolo cambiamento nelle condizioni iniziali della traiettoria del pianeta non altererò molto il suo percorso. Sembra però che il gioco da biliardo del sistema solare sia più interessante di quello a cui mi dedicavo da studente.

Per quanto appaia sorprendente, se modifico la forma del tavolo da biliardo l'idea che la maggior parte delle persone ha si rivela errata. Per esempio, lanciando delle palline su un tavolo da biliardo sagomato come uno stadio, con i due lati corti di forma

semicircolare e i due lati lunghi rettilinei, le traiettorie seguite dalle palline possono divergere in maniera drastica anche se la loro direzione iniziale era quasi la stessa. È la firma inconfondibile del caos: una sensibilità a cambiamenti molto piccoli nelle condizioni iniziali.



Le traiettorie di una pallina che corre su un tavolo da biliardo a forma di stadio divergono molto rapidamente anche se le condizioni iniziali dei lanci sono quasi uguali.

Dunque la sfida che mi pongo è stabilire se il modo in cui cade il mio dado è prevedibile, come in un gioco di biliardo convenzionale, o se invece il dado giochi su un biliardo caotico.

Il diavolo nei decimali

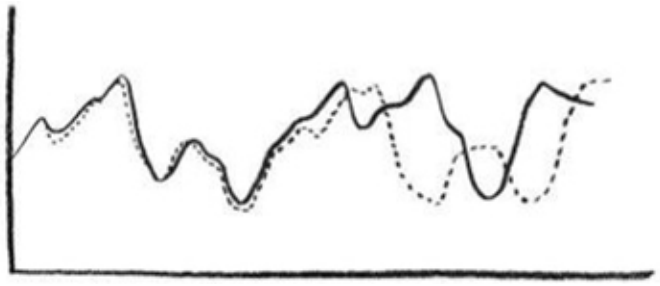
Benché si attribuisca a Poincaré il ruolo di padre della teoria del caos, in realtà questa sensibilità di molti sistemi dinamici ai piccoli cambiamenti nelle condizioni iniziali rimase nell'ombra per molti decenni nel corso del Novecento. In effetti fu necessario che il fenomeno venisse riscoperto dallo scienziato Edward Lorenz (quando, proprio come Poincaré, pensava di aver commesso qualche errore) perché i concetti del caos raggiungessero una maggiore notorietà.

Nel 1963, mentre lavorava come meteorologo al MIT, Lorenz aveva inserito nel suo computer delle equazioni relative al cambiamento della temperatura in un fluido in movimento. Quando decise che aveva bisogno di ripetere l'elaborazione di una delle sue simulazioni prolungandone la durata nel tempo, prese alcuni dei dati che il computer gli aveva fornito in precedenza e ve li reinserì, convinto di poter far ripartire la simulazione da quel punto.

Quando tornò dalla pausa caffè, scoprì con grande disappunto che il computer non aveva riprodotto i dati precedenti e aveva invece generato molto velocemente una previsione per il

cambiamento della temperatura che divergeva drasticamente dalla prima. All'inizio non riuscì a capire che cosa fosse successo. Se inserisci gli stessi numeri in un'equazione, non ti aspetti di ritrovarti con una risposta diversa alla fine dei calcoli. Gli ci volle un po' per realizzare l'accaduto: in realtà non aveva inserito gli stessi numeri. Sulla stampata dei dati generata dal computer che aveva usato, i numeri erano riprodotti fino alla terza cifra decimale, mentre i calcoli erano stati fatti usando numeri che arrivavano alla sesta cifra decimale.

Insomma, sebbene i numeri fossero di fatto diversi, lo erano soltanto a partire dalla quarta cifra decimale. Non ci si aspetterebbe che ciò faccia una gran differenza, ma Lorenz notò che una discrepanza tanto piccola nei numeri inseriti aveva un notevole impatto sul risultato finale. Qui sotto potete vedere due grafici creati usando la stessa equazione i cui dati differiscono leggermente. Un grafico corrisponde all'equazione in cui è stato inserito il dato numerico 0,506127. Il secondo è prodotto dall'equazione in cui il dato numerico inserito è stato approssimato a 0,506. Sebbene all'inizio i due grafici seguano andamenti simili, molto presto il loro comportamento si differenzia sensibilmente.



La simulazione che Lorenz stava facendo eseguire al suo computer era un modello semplificato di simulazioni del tempo atmosferico che analizzavano come si comporta un flusso d'aria quando è soggetto a differenze di temperatura. La riscoperta di come dei piccoli cambiamenti nelle condizioni iniziali di un sistema possano avere un grande impatto sull'esito finale avrebbe avuto conseguenze enormi sui nostri tentativi di utilizzare equazioni matematiche per fare previsioni relative al futuro. Come scrisse Lorenz,

> Due stati che erano impercettibilmente diversi potevano evolvere in due stati considerevolmente diversi. È presumibile che un qualsiasi errore nell'osservazione dello stato presente – e, in un sistema reale, tali errori appaiono inevitabili – renda impossibile fare una previsione accettabile di come evolverà lo stato nel futuro remoto.

La vendetta della cavalletta

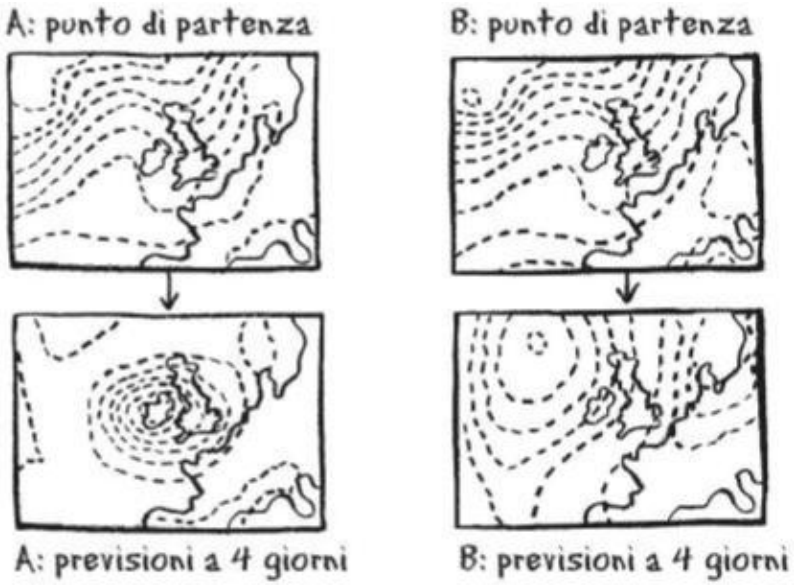
Quando Lorenz spiegò ciò che aveva scoperto a un collega, si sentì rispondere: «Edward, se la tua teoria è corretta, il battito d'ala di un gabbiano potrebbe alterare il corso della storia per sempre».

Nel 1972 il gabbiano fu sostituito dalla celebre farfalla quando Lorenz espose i suoi risultati all'American Association for Advancement of Science in una conferenza intitolata «Può il battito d'ali di una farfalla provocare un tornado in Texas?».

Sia il gabbiano che la farfalla avrebbero potuto essere preceduti dalla cavalletta. Sembra infatti che il professor W.S. Franklin avesse compreso l'effetto devastante che la comunità degli insetti poteva avere sul tempo meteorologico già nel 1898. Nella recensione a un libro, Franklin espresse la seguente opinione:

> Una causa infinitesimale potrebbe produrre un effetto finito. Fare previsioni meteorologiche dettagliate a lungo termine risulta dunque impossibile; la sola previsione dettagliata che è possibile fare è la deduzione della tendenza e del carattere finali di un temporale a partire dall'osservazione delle sue primissime fasi, e l'accuratezza di una tale previsione è soggetta a circostanze tali per cui il volo di una cavalletta in Montana potrebbe deviare un temporale da Filadelfia a New York!

È una situazione davvero bizzarra. Le equazioni che la scienza ha scoperto mi forniscono una descrizione completamente deterministica dell'evoluzione di molti sistemi dinamici come le condizioni meteorologiche. E tuttavia mi è negata la possibilità di accedere alle previsioni che quelle equazioni mi permetterebbero di fare perché qualsiasi misurazione dell'ubicazione di una particella o della velocità del vento in quel punto sarà inevitabilmente un'approssimazione delle condizioni effettive.



Partendo da condizioni del tempo iniziali pressoché identiche, la previsione A annuncia forte vento e pioggia battente su tutte le isole britanniche entro quattro giorni, mentre la previsione B annuncia l'arrivo di una zona di alta pressione proveniente dall'Atlantico.

È per questo che, quando fa le previsioni del tempo, il Servizio meteorologico nazionale britannico, dopo aver raccolto i dati registrati nelle stazioni sparse su tutto il territorio, non inserisce solo quei dati nelle equazioni, ma ricalcola il risultato molte migliaia di volte utilizzando una gamma di valori centrati sui dati raccolti. Le previsioni così ottenute si mantengono simili per un certo periodo, ma nel giro di circa cinque giorni i risultati spesso divergono al punto che, se un insieme di dati predice l'arrivo di un'ondata di calore su tutto il territorio nazionale, qualche cambiamento nei valori decimali degli stessi dati dà come risultato pioggia battente ovunque.

Nel libro *Materia e moto*, pubblicato nel 1877, il grande scienziato scozzese James Clerk Maxwell espresse l'importante distinzione tra il carattere deterministico di un sistema e la sua conoscibilità: «Una massima spesso citata afferma che "Le stesse cause produrranno sempre gli stessi effetti"». Ciò vale senza alcun dubbio per un'equazione matematica che descrive un sistema dinamico. Inserite gli stessi numeri in un'equazione e non avrete sorprese sul risultato. Ma Maxwell proseguiva: «Un'altra massima che non va confusa con la precedente afferma che "Cause simili producono effetti simili". Ciò è vero soltanto nel caso in cui piccole variazioni nelle condizioni iniziali producano solo piccole variazioni nello stato finale del sistema». La scoperta della teoria del caos nel Novecento confermò che questa seconda massima è, in generale, falsa.

Tale sensibilità a piccoli cambiamenti nelle condizioni iniziali rischia seriamente di sabotare i miei tentativi di utilizzare le equazioni che ho messo per iscritto per predire l'esito del lancio di un dado. Ho le equazioni, d'accordo, ma sono proprio certo di aver misurato con esattezza l'angolo a cui il piccolo cubo abbandona la mia mano, la velocità con cui ruota e la distanza dal tavolo?

Senza dubbio, non sempre tutto è irrimediabilmente senza speranza. Ci sono casi in cui piccoli cambiamenti non alterano il risultato delle equazioni in maniera radicale. Un esempio tipico è il calcolo delle traiettorie su un tavolo da biliardo classico. Ciò che conta è sapere quando la conoscenza non è più possibile. Un bell'esempio di individuazione del punto oltre il quale è impossibile conoscere ciò che accadrà in futuro fu scoperto dal matematico Robert May mentre analizzava le equazioni relative alla crescita di una popolazione.

Sapere quando non è possibile sapere

Nato in Australia nel 1936, May aveva iniziato la sua carriera scientifica come fisico, occupandosi di superconduttività. Ma la sua attività accademica subì una brusca svolta quando, alla fine degli anni Sessanta, fu coinvolto nel neonato movimento per la responsabilità sociale della scienza. La sua attenzione si spostò dal comportamento di un insieme di elettroni al problema più pressante della dinamica delle popolazioni nel mondo animale. All'epoca la biologia non era un ambito molto frequentato da chi si occupava di matematica, ma tutto questo sarebbe cambiato proprio a seguito del lavoro di May. Fu la fusione tra la preparazione matematica rigorosa che aveva ricevuto come fisico e una nuova sensibilità nei confronti delle problematiche biologiche a condurlo alla sua grande scoperta.

In un articolo pubblicato su «Nature» nel 1976 con il titolo *Modelli matematici semplici con dinamiche molto complicate*, May analizzò la dinamica di un'equazione matematica che descriveva la crescita di una popolazione da una stagione alla successiva. Con questo studio riuscì a mostrare come persino un'equazione dall'aspetto assolutamente innocente possa produrre un comportamento straordinariamente complesso dei dati

numerici. La sua equazione per il calcolo della dinamica di una popolazione non era una complicata equazione differenziale bensì una semplice equazione ricorsiva discreta che chiunque possieda una calcolatrice può esplorare.

▶ *Equazione ricorsiva per il calcolo della dinamica di una popolazione*

Supponete di avere una popolazione di animali il cui numero può variare tra 0 e un certo valore ipotetico massimo che chiameremo N. Data una certa frazione Y (compresa tra 0 e 1) del massimo, l'equazione stabilisce quale sarà la frazione aggiornata della popolazione sopravvissuta dopo la riproduzione e la competizione per il cibo. Supponiamo che in ciascuna stagione il tasso di riproduzione sia dato da un numero r. Perciò, se la frazione della popolazione massima sopravvissuta al termine della stagione era Y, la prossima generazione salirà a $r \times Y \times N$.

Ma non tutti questi nuovi esemplari sopravvivranno. L'equazione stabilisce che la frazione che non sopravvivrà è anch'essa pari a Y. Perciò, degli $r \times Y \times N$ animali con cui inizia la stagione, $Y \times (r \times Y \times N)$ muoiono. Così il totale di esemplari che sopravvivrà al termine della stagione sarà pari a $(r \times Y \times N) - (r \times Y^2 \times N) = [r \times Y \times (1 - Y)] \times N$, il che significa che la frazione della popolazione massima che esiste nella stagione attuale è pari a $r \times Y \times (1 - Y)$. ◀

In sostanza il modello ipotizza che al termine di ciascuna stagione la popolazione sopravvissuta vada moltiplicata per un fattore costante, chiamato r, ovvero il tasso di riproduzione, per ottenere il numero di animali all'inizio della stagione successiva. Ma le risorse non bastano affinché tutti sopravvivano. L'equazione calcola allora quanti di questi animali ce la faranno fino al termine della stagione. Il numero dei sopravvissuti risultante andrà poi moltiplicato di nuovo di un fattore r per la generazione successiva. La proprietà affascinante di questa equazione è data dal fatto che il suo comportamento dipende solo dalla scelta di r, il tasso di riproduzione. Alcune scelte di r conducono a comportamenti estremamente prevedibili. In questi casi potrò sapere esattamente come evolverà la popolazione. Tuttavia, c'è una soglia del valore di r oltre la quale non abbiamo più il controllo della situazione. L'equazione non ci consente previsioni perché l'aggiunta di un solo esemplare alla formula può produrre una dinamica della popolazione drasticamente diversa.

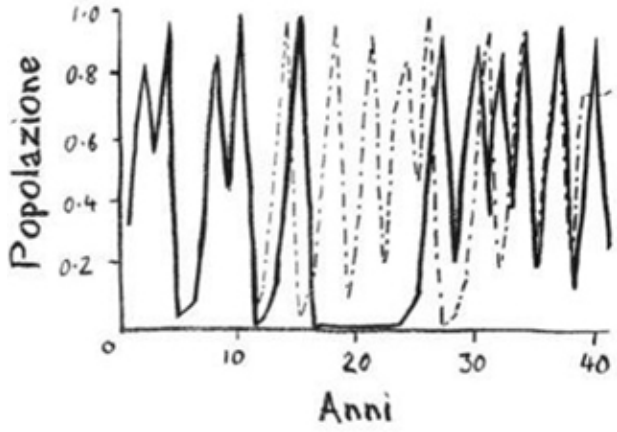
Per esempio, May scoprì che se r è compreso tra 1 e 3, allora la popolazione alla fine si stabilizza. In questo caso non importa quali siano le condizioni iniziali, le cifre tenderanno gradatamente verso un valore fissato che dipende da r. È un po' come giocare a biliardo su un tavolo al centro del quale c'è una buca. Comunque io la lanci, prima o poi la pallina finirà in fondo alla buca.

Per *r* superiore a 3, continua a esserci un'area di comportamento prevedibile, ma con caratteristiche leggermente diverse. Quando *r* è compreso tra 3 e 1 + √6 (che è circa pari a 3,44949), la dinamica della popolazione finisce per assumere alternativamente due valori che dipendono da *r*. Quando *r* è superiore a 1 + √6, notiamo che la dinamica della popolazione assume di nuovo caratteristiche diverse. Per *r* compreso tra 1 + √6 e 3,54409 (o, più esattamente, la soluzione di un'equazione polinomiale di dodicesimo grado), sono quattro i valori che la popolazione assume ciclicamente. Man mano che *r* aumenta ancora, avrò 8 valori, poi 16 e così via. Al crescere di *r*, il numero di valori distinti raddoppia ogni volta finché non raggiungiamo una soglia oltre la quale la natura della dinamica passa da periodica a caotica.

Quando May studiò per la prima volta quest'equazione, dovette ammettere di non sapere che cosa succedesse oltre quella soglia. Usando una lavagna che teneva fuori dal suo ufficio di Sydney, offrì un premio di 10 dollari australiani a chiunque riuscisse a spiegare quel comportamento. «Sembra un gran casino» scrisse sulla lavagna.

Fu durante una trasferta all'Università del Maryland che May ottenne la risposta che cercava, e fu in quell'occasione che fu coniato effettivamente il termine «caos». Nel seminario che tenne, spiegò quale fosse l'intervallo di valori di *r* in cui il periodo raddoppiava, ma riconobbe di essersi imbattuto in un punto oltre il quale non aveva idea di che cosa diavolo accadesse. Tra il pubblico c'era un matematico che lo sapeva. Jim Yorke non aveva mai visto il raddoppiamento dei valori ciclici assunti dalla popolazione, ma sapeva esattamente che cosa succedeva per valori di *r* maggiori di quelli compresi in quell'intervallo. Ed era ciò che chiamava caos.

Per *r* maggiore di 3,56995 (o, per essere più precisi, maggiore del valore limite delle soluzioni di un sistema di equazioni di grado crescente), la dinamica della popolazione diventa molto sensibile alle caratteristiche della popolazione di partenza. Basta modificare il numero iniziale di animali di una quantità minuscola perché ne derivi un risultato totalmente diverso.



L'evoluzione di due popolazioni con un valore di $r = 4$ che partono con una differenza di appena un esemplare su mille. Sebbene all'inizio la dinamica delle due popolazioni sia simile, dopo quindici anni esse mostrano comportamenti molto diversi.

Quando agisco sul valore di *r*, tuttavia, posso ancora individuare sacche di regolarità oltre il valore di soglia, come aveva scoperto Jim Yorke. Per esempio, per $r = 3{,}627$ la popolazione comincia di nuovo a variare in maniera periodica, passando ciclicamente per 6 valori distinti. Se continuiamo a innalzare il valore di *r* e il 6 diventerà 12 e poi 24, raddoppiandosi finché non interverrà di nuovo il caos.

Bob May si rese conto di quale potente colpo d'avvertimento fosse un sistema tanto semplice per chiunque pensasse di sapere tutto: «Non solo nel campo della ricerca, ma anche nella realtà quotidiana della politica e dell'economia, ce la passeremmo meglio se un numero maggiore di persone comprendesse che i sistemi semplici non necessariamente possiedono proprietà dinamiche semplici».

La politica del caos

Attualmente Bob May mette in pratica ciò che predica. O forse dovrei chiamarlo Lord May di Oxford, come mi corregge l'uomo in cappello a cilindro che mi accoglie all'ingresso della Camera Alta riservato ai rappresentanti. Negli ultimi anni May ha unito ai suoi impegni scientifici un energico attivismo politico. Ora siede sui banchi della Camera dei Lord come membro del gruppo misto. Ed è lì che sono andato a trovarlo all'ora di pranzo per scoprire che cosa stesse facendo nel quadro della sua missione volta a

mettere i politici in guardia sull'effetto che i sistemi caotici possono avere sulla società.

Dopo che l'uomo col cilindro e alcuni poliziotti armati di mitra mi fecero varcare l'ingresso riservato ai parlamentari, trovai May ad attendermi oltre i metal detector e i macchinari ai raggi X. May non vuole avere niente a che fare con tutti questi titoli formali e, con i suoi schietti modi australiani, insiste ancora perché lo si chiami Bob. «Temo di aver combinato un guaio e di aver già pranzato, ma verrò con lei al ristorante e mangerò un po' di torta.» Mentre consumavo un piatto di pesce, lui si divorò un'enorme fetta di torta al cioccolato della Camera dei Lord. A settantanove anni, May è più attivo e impegnato che mai. Dopo il suo secondo pranzo doveva precipitarsi alla seduta di una commissione parlamentare in cui si discuteva dell'impatto di un nuovo collegamento ferroviario tra la capitale e il Nordovest dell'Inghilterra.

Prima di entrare nella Camera dei Lord, May era stato consigliere scientifico del governo conservatore di John Major e poi di quello laburista presieduto da Tony Blair. Mi chiedevo quali difficoltà presentassero gli equilibrismi richiesti da quell'incarico politico a un uomo che di solito non ha problemi a dire le cose come stanno.

«Prima che mi fosse affidato l'incarico, mi fu spiegato che ci sarebbero state occasioni in cui sarei stato chiamato a difendere le decisioni di un ministro e mi fu chiesto che cosa pensavo al riguardo. Risposi che mai, in nessun caso, avrei negato un fatto. D'altro canto, sono piuttosto bravo in quel genere di gare dialettiche in cui ti viene assegnato un argomento e in base al lancio di una moneta devi sostenere l'una o l'altra delle due tesi contrapposte. Perciò dissi che sarei stato felice di spiegare le ragioni per cui il ministro era arrivato a quella scelta, ma non avrei accettato di avallarla se non fosse stata giusta.»

Era la tipica risposta di un matematico. Partire dagli assiomi del ministro per eseguire la dimostrazione che conduceva alle conclusioni. Un approccio che esclude giudizi personali. Ciò non significa che May non sia pronto a esporre il proprio punto di vista sulle questioni sul tavolo e a difenderlo con caparbietà.

Ero curioso di sapere come si comportano i governi di fronte ai problemi che la teoria del caos presenta a chiunque debba prendere decisioni politiche. Come se la cavano i politici davanti

alla sfida di predire il futuro o di manipolarlo, considerato che possiamo avere solo una conoscenza parziale dei sistemi analizzati?

«Penso che sia un resoconto decisamente lusinghiero di quello che avviene qui dentro. Se si escludono alcune eccezioni degne di nota, si tratta perlopiù di un gruppo di persone molto egoiste, interessate principalmente alla propria carriera.»

E riguardo a May personalmente? Quale impatto hanno avuto le sue scoperte su ciò che lui pensa del ruolo della scienza nella società?

«Fu una cosa strana. Fu la fine del sogno newtoniano. Quando ero uno studente di dottorato si pensava che con la continua crescita della potenza di calcolo dei computer si sarebbero avute previsioni meteorologiche sempre migliori, dato che conoscevamo le equazioni e avremmo potuto creare modelli più realistici dell'atmosfera terrestre.»

Tuttavia May è attento a non lasciare che i negazionisti del cambiamento climatico usino la teoria del caos come strumento per minare il dibattito.

«Affermare di non credere nel cambiamento del clima perché non ci si può fidare delle previsioni del tempo è un po' come dire che siccome non posso sapere quando la prossima onda si infrangerà sulla Bondi Beach non credo nelle maree.»

May ama citare un brano tratto dalla pièce teatrale di Tom Stoppard *Arcadia* per illustrare la strana tensione che esiste tra la capacità della scienza di farci conoscere alcune cose con straordinaria precisione e la teoria del caos, che ci nega la conoscenza di molte parti del mondo naturale. Una delle protagoniste, Valentine, dichiara:

> Siamo più bravi a prevedere eventi ai confini di una galassia o all'interno del nucleo di un atomo che a prevedere pioggia o sole fra tre domeniche quando tua zia darà la festa in giardino.[2]

May scherza sul fatto che le sue opere più citate non siano gli articoli accademici di alto profilo che ha pubblicato su prestigiose riviste scientifiche come «Nature», ma le note che scrisse per l'opuscolo distribuito al pubblico in occasione della prima rappresentazione della pièce di Stoppard al National Theatre di Londra. «Mette in ridicolo il modo in cui si usano tutti quegli

indici di citazioni per misurare l'impatto delle ricerche scientifiche.»

L'equazione umana

Quali sono dunque le grandi questioni aperte della scienza di cui May vorrebbe conoscere la risposta? La coscienza? L'esistenza di un universo infinito?

«Temo che su questo il mio punto di vista sia assai meno grandioso, che lo vedrei più nei termini delle cose a cui sto lavorando al momento. Quasi per caso, sono stato coinvolto in questioni che riguardano l'attività bancaria.»

La cosa mi sorprese. Il problema di creare un sistema bancario stabile sembrava decisamente poco interessante, ma negli ultimi tempi May sta applicando i suoi modelli di diffusione delle malattie infettive e della dinamica delle reti alimentari in ecologia per comprendere la crisi bancaria del 2008. In collaborazione con Andrew Haldane della Banca d'Inghilterra, sta studiando la rete finanziaria come se fosse un ecosistema. La ricerca ha rivelato come strumenti finanziari intesi a ottimizzare gli utili delle singole istituzioni con rischi apparentemente minimi possano produrre instabilità del sistema nel suo complesso.

May ritiene che il problema non risieda necessariamente nei meccanismi del mercato, ma che possa invece dipendere dal modo in cui piccoli fattori presenti nel mercato vengono amplificati e distorti nell'interazione con gli esseri umani. Ciò che lo preoccupa maggiormente riguardo al caos del sistema bancario è la necessità di intervenire meglio sul contagio della paura.

«Il problema è come inserire il comportamento umano nel modello. Non penso che la psicologia umana sia matematizzabile. Qui stiamo giocando a dadi con il nostro futuro. Ma quando cerchi di prevedere l'esito del lancio di un dado, vorresti conoscere la situazione di chi possiede il dado.»

Era una cosa di cui non avevo tenuto conto nei miei tentativi di predire l'esito del lancio del mio dado da gioco. Forse dovrei includere nei miei calcoli chi mi ha venduto il dado.

«Secondo me molti dei maggiori problemi che la società deve affrontare sono al di fuori del dominio della scienza e della matematica. Dobbiamo affidarci alle scienze del comportamento per raggiungere la salvezza.»

Basta guardarsi intorno nel ristorante della Camera dei Lord per rendersi conto di quale sia l'estensione e la complessità del comportamento umano all'opera. Ciò rende l'impresa di matematizzare anche solo le interazioni che avvengono in questo minuscolo microcosmo praticamente impossibile. Come spiegò lo storico francese Fernand Braudel durante una lezione tenuta ai suoi compagni di prigionia in un campo di detenzione tedesco nei pressi di Lubecca durante la Seconda guerra mondiale, «un numero inverosimile di dadi, sempre in movimento, domina e decide di ogni singola esistenza». Sebbene ciascun singolo lancio dei dadi sia imprevedibile, emergono degli schemi regolari nel comportamento dei dadi sul lungo periodo. Secondo Braudel è questo che rende possibili gli studi storici. «La storia è sì "una povera piccola scienza congetturale" quando ha per oggetto individui isolati dal gruppo, quando tratta di avvenimenti, ma è molto meno congetturale e ben più razionale sia nei procedimenti sia nei risultati, quando prende in esame i gruppi e il ripetersi di avvenimenti.»[3]

May ritiene però che comprendere la storia e le origini dell'insieme di dadi che costituiscono l'intera specie umana non sia semplice come afferma Braudel. Per esempio, non è affatto chiaro se siamo in grado di analizzare come siamo giunti a questo punto del nostro viaggio evolutivo.

«Le dirò qual è una delle questioni che io considero più interessanti: cercare di comprendere la traiettoria evolutiva seguita dalla specie umana su questo pianeta. La traiettoria che sembriamo seguire è la stessa che si verifica su tutti i pianeti o sulla maggior parte di essi? Oppure è il risultato di fluttuazioni precedenti nel caos ad averci condotto su questa traiettoria anziché su un'altra? Ne sapremo mai abbastanza per poterci chiedere se la catastrofe verso cui sembriamo diretti sia inevitabile o se ci siano tanti altri pianeti i cui abitanti sono più simili al signor Spock, cioè meno emotivi, meno esuberanti, ma più distaccati e analitici?»

Finché non scopriremo altri pianeti abitati e non potremo studiare le loro traiettorie, sarà difficile stabilire se l'evoluzione ci

condurrà inevitabilmente a ecosistemi mal gestiti basandosi su quell'unico insieme di dati che prende il nome di pianeta Terra.

«Penso che non sapremo mai se il destino verso cui stiamo andando sia qualcosa che si verifica su tutti i pianeti abitati o se esistono altri pianeti in cui le cose non vanno così.»

Dopo aver detto questo, May si spazzolò gli ultimi rimasugli della sua torta al cioccolato e si rituffò nel caos delle commissioni parlamentari e della gretta politica di Westminster.

L'ultima affermazione di May riguarda il problema che la teoria del caos pone a chiunque voglia conoscere non solo il futuro ma anche il passato. Nel caso del futuro, possiamo quanto meno aspettare di vedere quale esito produrranno le equazioni caotiche. Ma procedere all'indietro e cercare di capire in quale stato si trovava il nostro pianeta per aver prodotto il nostro presente è altrettanto, se non più, difficile. Il passato, ancor più del futuro, è probabilmente qualcosa che non potremo mai conoscere veramente.

La vita è il lancio casuale di un dado?

Nella sua ricerca pionieristica, May studiò la dinamica di una popolazione da una stagione all'altra. Ma che cosa determina quali esemplari sopravvivono e quali invece muoiono prima di riprodursi? Secondo Darwin, la questione si riduce semplicemente a un lancio fortunato dei dadi dell'evoluzione.

Il modello dell'evoluzione sulla Terra si basa sull'idea che quando si hanno organismi dotati di DNA, i discendenti di questi organismi condividono il DNA di quelli che li hanno generati. Tuttavia, una parte del codice genetico contenuto nel DNA può subire mutazioni casuali, che si riducono in buona sostanza al lancio casuale del dado evolutivo. C'è però un secondo filo importante nella teoria proposta da Darwin: il concetto di selezione naturale.

Alcune di quelle modifiche casuali conferiranno ai discendenti accresciute possibilità di sopravvivere, mentre altri produrranno uno svantaggio. L'idea centrale dell'evoluzione per selezione naturale è che ci sono maggiori probabilità che il cambiamento vantaggioso sopravvivrà abbastanza a lungo per riprodursi.

Supponete, per esempio, che io parta da una popolazione di giraffe dal collo corto. L'ambiente in cui vivono le mie giraffe cambia in modo tale per cui aumenta il cibo sugli alberi, cosicché ogni giraffa che nasca con un collo più lungo avrà maggiori chance di sopravvivere. Ipotizziamo che, per stabilire la probabilità di una mutazione per ciascuna giraffa nata nella generazione successiva a questo cambiamento ambientale, io lanci il mio dado. Un lancio che dia come esito 1, 2, 3, 4 o 5 condanna la giraffa ad avere un collo della stessa lunghezza o più corto, mentre a un lancio che dia come esito 6 corrisponde una mutazione casuale che produce un collo più lungo. Le fortunate giraffe con il collo più lungo si prenderanno il cibo e quelle con il collo più corto non sopravvivranno abbastanza per riprodursi. Perciò sono solo le giraffe dal collo più lungo ad avere la possibilità di trasmettere il loro DNA.

Nella generazione successiva succede la stessa cosa. Se il lancio del dado dà come risultato 1, 2, 3, 4 o 5 la giraffa non cresce più dei suoi genitori, ma un altro 6 la farà crescere un po' di più. Di nuovo, a sopravvivere saranno le giraffe più alte. L'ambiente favorisce le giraffe che hanno ottenuto 6 nel lancio del dado. Ogni generazione finisce per essere un po' più alta della precedente finché non si giunge a un punto in cui un ulteriore aumento dell'altezza non costituisce più un vantaggio.

È la combinazione di caso e di selezione naturale che ci porta a vedere un maggior numero di giraffe i cui progenitori hanno tutti ottenuto un 6 nel lancio del dado. Con il senno di poi, vedere tanti 6 di fila sembra il frutto di una combinazione strabiliante, ma il fatto è che non vediamo nessuno degli altri esiti dei lanci perché gli esemplari di giraffa a essi associati non sono sopravvissuti. Quello che appare come un gioco truccato è semplicemente il frutto della combinazione di caso e selezione naturale. Non c'è l'intervento di un disegno né un aggiustamento. La sequela di 6 consecutivi non è un colpo di fortuna ma è in effetti la sola cosa che ci aspetteremmo di vedere in base a questo modello evolutivo.

È un modello di stupenda semplicità, ma considerata la complessità dei cambiamenti ambientali e la gamma delle possibili mutazioni, questo modello può produrre risultati straordinariamente articolati, come conferma la mera varietà delle specie che popolano la Terra. Una delle ragioni per cui non mi sono mai innamorato della biologia è il fatto che parrebbe

impossibile trovare una spiegazione del perché da questo modello di evoluzione sono scaturiti i gatti e le zebre e non qualche altro strano assortimento di specie animali. Mi sembrava tutto così arbitrario. Ma è un'impressione corretta?

C'è un dibattito interessante in corso nell'ambito della biologia evolutiva su quali siano le probabilità dei risultati dell'evoluzione di cui siamo testimoni oggi. Se riavvolgessimo il nastro della storia della Terra fino a un punto del passato e gettassimo di nuovo il dado, vedremmo apparire qualcosa di molto simile oppure di molto diverso? È questo l'interrogativo sollevato da May al termine del nostro pranzo.

Sembra che alcune parti dell'evoluzione appaiano inevitabili. È straordinario il fatto che nel corso della storia del nostro pianeta l'occhio si sia evoluto indipendentemente tra le 50 e le 100 volte. È una prova convincente del fatto che distinti lanci del dado che hanno riguardato specie diverse abbiano prodotto specie dotate di occhi a prescindere da ciò che accadeva attorno. Moltissimi altri esempi illustrano come alcuni caratteri, se vantaggiosi, sembrino emergere con prepotenza dalla palude evolutiva. Se ne ha conferma ogni volta che si vede comparire lo stesso carattere più di una volta in aree diverse del regno animale. L'ecolocalizzazione, per esempio, è usata sia dai delfini che dai pipistrelli, ma questo tratto si è evoluto negli uni e negli altri in maniera indipendente e in punti diversi dell'albero evolutivo.

Non è tuttavia chiaro fino a che punto il modello garantisca che questi esiti si materializzino. Se c'è vita su un altro pianeta, essa avrà una qualche somiglianza con la vita che si è evoluta qui sulla Terra? Si tratta di una delle grandi questioni aperte nella biologia evolutiva. Per quanto possa essere difficile rispondervi, io non credo che si possa qualificare come qualcosa che non potremo mai sapere. Magari non lo scopriremo mai, ma non c'è nulla nella sua natura che ci precluda la possibilità di trovare una risposta.

Da dove veniamo?

Esistono altre grandi questioni irrisolte nel campo della biologia evolutiva che possano candidarsi a cose che non potremo mai sapere? Per esempio, perché, 542 milioni di anni fa, all'inizio del periodo Cambriano, ci fu un'esplosione di diversità di forme

viventi sulla Terra? Prima di allora la vita consisteva di organismi unicellulari che si univano a formare colonie. Ma nel corso dei 25 milioni di anni successivi, un periodo di tempo relativamente breve sulla scala dell'evoluzione, si assiste a una rapida diversificazione di forme di vita multicellulari che finisce per assomigliare alla diversità di cui siamo testimoni oggi. Manca ancora una spiegazione convincente di questa accelerazione straordinaria del ritmo dell'evoluzione. Ciò è in parte dovuto alla mancanza di dati relativi a quel periodo. Potremo mai recuperare quei dati? Oppure le ragioni dell'esplosione del Cambriano rimarranno per sempre un mistero?

Di solito la teoria del caos è un fattore limitante per ciò che possiamo sapere del futuro. Ma può anche comportare limiti su ciò che sappiamo del passato. Conosciamo gli effetti, ma dedurne la causa significa eseguire le equazioni a ritroso. In assenza di dati completi, lo stesso principio si applica procedendo in avanti o all'indietro. Potremmo trovarci in due punti di partenza molto divergenti che possono spiegare esiti molto simili. Ma non sapremo mai quale di queste due origini possibili è stata la nostra.

Uno dei grandi misteri della biologia evolutiva è come sia cominciata la vita. Forse il gioco della vita favorisce sequele di 6 nei lanci del dado dell'evoluzione, ma come si è evoluto il gioco stesso? Sono state fatte stime delle probabilità che si verifichino tutte le condizioni necessarie a produrre molecole che si autoreplicano. In alcuni modelli dell'origine della vita tali probabilità equivalgono a dover lanciare 36 dadi e ottenere 6 in tutti e 36 i casi. Per qualcuno questa è una prova del fatto che deve esserci un creatore che manipola il gioco. Ma ciò significa non rendersi conto della scala temporale su cui stiamo operando.

I miracoli accadono… se il tempo è sufficiente. Anzi, sarebbe più incredibile se tali anomalie non si verificassero. Il punto è che spesso le anomalie risaltano e vengono notate, mentre i lanci meno eccitanti del dado tendono a essere ignorati.

La lotteria è un banco di prova perfetto per il manifestarsi di miracoli in un processo casuale. Il 6 settembre 2009 nella lotteria di Stato bulgara furono estratti i seguenti sei numeri vincenti:

4, 15, 23, 24, 35, 42.

Quattro giorni dopo uscirono di nuovo gli stessi sei numeri. Assurdo, penserete probabilmente. Di sicuro lo pensò il governo

bulgaro, che ordinò un'inchiesta immediata su un possibile caso di corruzione. Quello di cui il governo non tenne conto è che ogni settimana, in tutto il pianeta, da decenni si tengono altre lotterie. Se fate i calcoli, scoprirete che sarebbe più sorprendente non assistere a un risultato in apparenza tanto anomalo.

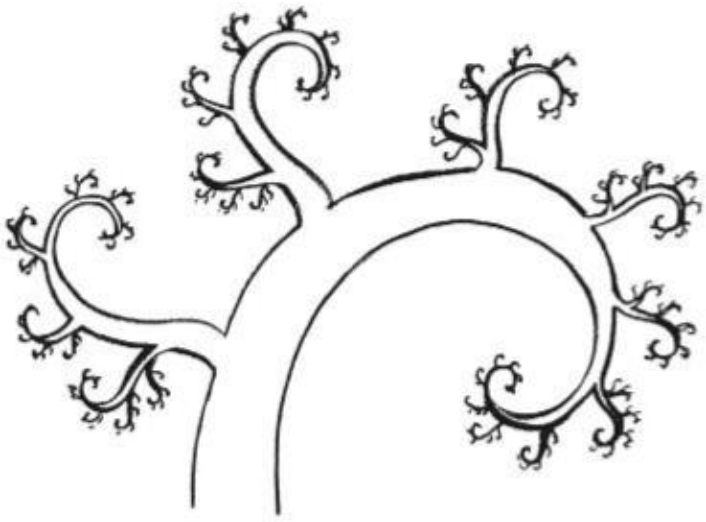
Lo stesso principio si applica alle condizioni necessarie a produrre molecole che si autoreplicano nel brodo primordiale che copriva la Terra prima che emergesse la vita. Miscelate grandi quantità di idrogeno, acqua, anidride carbonica e di qualche altro gas organico ed esponetele a fulmini e a radiazioni elettromagnetiche e, come è già stato mostrato da vari esperimenti di laboratorio, emergeranno materiali organici che si trovano solo negli esseri viventi. Nessuno è ancora riuscito ottenere in laboratorio la comparsa spontanea di qualcosa di straordinario come il DNA. Le probabilità di riuscirci sono estremamente piccole.

Ma è proprio questo il punto, perché dati i miliardi di miliardi di pianeti disponibili nell'universo su cui eseguire questo esperimento e i miliardi di anni per lasciarlo proseguire, sarebbe più inverosimile se quella possibilità remotissima di creare qualcosa di simile al DNA non si verificasse. Continuate a lanciare 36 dadi su un miliardo di miliardi di pianeti per un miliardo di anni e con ogni probabilità farete un lancio che darà come risultato 6 per tutti e 36 i dadi. Una volta che avrete una molecola che si autoreplica, questa avrà il modo di propagarsi, perciò vi serve un solo colpo di fortuna per far partire l'evoluzione.

Dal punto di vista di noi esseri umani il problema è che, quando si tratta di rendersi conto delle possibilità che accada un miracolo come l'emergere della vita, non abbiamo sviluppato una mente in grado di orientarsi con sicurezza tra i numeri molto grandi. Perciò la probabilità è un concetto che stentiamo a cogliere con l'intuito.

L'albero frattale della vita

Ma non è solo la matematica della probabilità a operare nell'evoluzione. L'albero evolutivo ha una caratteristica interessante che ricorda le forme che appaiono nella teoria del caos, una caratteristica che prede il nome di frattalità.



L’albero evolutivo frattale.

L’albero evolutivo è una rappresentazione dell’evoluzione della vita sulla Terra. Procedere lungo l’albero corrisponde a un movimento nel tempo. Ogni diramazione nell’albero indica l’evoluzione di una nuova specie. Se un ramo finisce, significa l’estinzione della specie corrispondente. La natura dell’albero è tale per cui la sua forma globale sembra replicarsi su scale via via più piccole. Questa è la caratteristica tipica degli oggetti che i matematici chiamano frattali. Se ingrandite una piccola parte dell’albero, essa assomiglia incredibilmente alla struttura su grande scala dell’intero albero. Da questa autosomiglianza consegue che risulta molto difficile stabilire a quale scala si stia guardando l’albero. Ed è proprio la peculiarità di un frattale.

In genere i frattali sono la firma geometrica di un sistema caotico, perciò la frattalità dell’albero della vita suggerisce come nell’evoluzione agisca una dinamica caotica: i piccoli cambiamenti nel codice genetico possono produrne di enormi nei risultati dell’evoluzione. Questo modello non è necessariamente in contraddizione con l’idea di convergenza, dato che nei sistemi caotici possono sempre esserci punti, chiamati attrattori, verso i quali il modello tende a evolversi. Sicuramente, tuttavia, mette in dubbio la possibilità che, facendo ripartire daccapo l’evoluzione, si ottenga qualcosa di simile a quanto esiste oggi sulla Terra. Il biologo evoluzionista Stephen Jay Gould sosteneva che se riavvolgessimo il nastro della vita e lo facessimo partire di nuovo giungeremmo a risultati molto diversi. Che è poi quello che ci aspetteremmo da un sistema caotico. Proprio come nel caso delle previsioni meteorologiche, lievi cambiamenti nelle condizioni iniziali possono produrre un esito drasticamente diverso.

Gould introdusse anche il concetto di equilibri punteggiati, vale a dire che le specie sembrano mantenersi stabili per lunghi periodi per poi subire quello che appare come un repentino cambiamento evolutivo. È stato dimostrato che è una ulteriore caratteristica tipica dei sistemi caotici. Se l'evoluzione della vita è contraddistinta da una dinamica caotica, molte questioni relative alla biologia evolutiva potrebbero ricadere nell'ambito delle cose che non possiamo arrivare a conoscere proprio a causa dei loro nessi con la matematica del caos.

Per esempio, potremo mai stabilire se l'apparizione della specie umana è una conseguenza inevitabile dell'attuale modello evolutivo? Un'analisi del DNA di diverse specie ci ha fornito conoscenze di portata eccezionale sul modo in cui gli animali si sono evoluti nel passato. Anche i reperti fossili, benché in parte incompleti, ci hanno fornito un modo per conoscere le nostre origini. Ma date le scale temporali coinvolte nell'evoluzione, è impossibile compiere un esperimento in cui si fa ripartire daccapo il nastro della vita sulla Terra per vedere se sarebbe potuto accadere qualcosa di diverso. Non appena scopriremo forme di vita su un altro pianeta (se mai succederà), disporremo di nuovi campioni da analizzare. Ma se anche non le scoprissimo, non tutto è perduto. Proprio come il Servizio meteorologico nazionale non deve replicare l'evoluzione reale del tempo per fare previsioni, grazie a simulazioni di modelli al computer ricostruiamo diversi possibili esiti del processo evolutivo accelerando il tempo. Tuttavia, il modello utilizzato nelle simulazioni sarà valido solo quanto le ipotesi formulate per crearlo. Se il nostro modello è sbagliato, non ci dirà che cosa accade effettivamente in natura.

Simili modelli virtuali hanno un ruolo fondamentale nei tentativi di rispondere al problema in cui Poincaré per primo si imbatté scoprendo il caos: la Terra è destinata a orbitare stabilmente attorno al Sole, permettendo così all'evoluzione di continuare a lanciare i suoi dadi? Quanto è al sicuro il nostro pianeta dai capricci del caos? Il nostro sistema solare è stabile e periodico, oppure dobbiamo preoccuparci della possibilità che una cavalletta sconvolga l'orbita della Terra attorno al Sole?

Una farfalla chiamata mercurio

Poincaré non fu in grado di rispondere alla domanda posta dal re di Svezia sul sistema solare: se cioè esso fosse destinato a rimanere in una situazione di equilibrio stabile o se potesse disgregarsi in una manifestazione catastrofica di moti caotici. La sua scoperta che alcuni sistemi dinamici possono essere sensibili a piccoli cambiamenti nei dati aprì la possibilità che forse mai riusciremo a conoscere il destino del sistema solare con grande anticipo sul dispiegarsi di un qualsiasi scenario potenzialmente devastante.

È possibile che, come nel caso della dinamica di una popolazione con un basso tasso riproduttivo, il sistema solare si trovi in una zona sicura di attività prevedibile. Purtroppo le prove di cui disponiamo suggeriscono di non farci rincuorare da questa confortante speranza matematica. Recenti modelli virtuali ci hanno fornito nuovi indizi del fatto che il sistema solare si trova all'interno di una zona dominata dalla matematica del caos.

Per misurare l'effetto di un piccolo cambiamento sull'esito finale posso usare uno strumento detto esponente di Lyapunov. Per esempio, nel caso del biliardo giocato su tavoli di forme differenti, potrò ottenere una misura di quanto catastrofico risulterà un piccolo cambiamento sull'evoluzione della traiettoria di una pallina. Se l'esponente di Lyapunov di un sistema è positivo, significa che un minimo cambiamento nelle condizioni iniziali del lancio porterà la distanza tra le traiettorie a divergere in misura esponenziale. Possiamo usare questo fatto come una definizione di caos.

Utilizzando questa misura, diversi gruppi di scienziati hanno confermato che il nostro sistema solare è effettivamente caotico. Hanno calcolato che la distanza tra due soluzioni orbitali inizialmente vicine aumenta di un fattore dieci ogni dieci milioni di anni. Ciò avviene sicuramente su una scala temporale diversa rispetto a quella che ci impedisce di fare previsioni meteorologiche attendibili. Nondimeno, significa che non posso avere alcuna conoscenza precisa di ciò che accadrà al sistema solare nel corso dei prossimi cinque miliardi di anni.

Se vi state chiedendo in preda alla disperazione se potremo mai conoscere qualcosa del futuro, vi consolerà sapere che la matematica non è del tutto incapace di fare predizioni. C'è infatti un evento che le equazioni ci garantiscono avverrà e a cui potremo assistere se sopravvivremo per cinque miliardi di anni a

partire da oggi. Tuttavia non è una gran bella notizia: la matematica ci dice che a quel punto il Sole avrà esaurito il proprio carburante e si trasformerà in una gigante rossa che avvilupperà la Terra e gli altri pianeti del sistema solare. Ma finché questa espansione del Sole non ingloberà l'intero sistema solare, io mi trovo a dover tentare di risolvere delle equazioni caotiche se voglio sapere quali pianeti ci saranno ancora per vedere quella gigante rossa.

Cioè, come nel caso delle previsioni del tempo, se voglio sapere che cosa accadrà, non posso far altro che eseguire simulazioni al computer in cui varierò leggermente le posizioni e le velocità dei singoli pianeti. In alcuni casi le previsioni ottenute sono piuttosto terrificanti. Nel 2009 gli astronomi francesi Jacques Laskar e Mickaël Gastineau hanno inserito nei loro computer diverse migliaia di modelli di evoluzione futura del sistema solare, identificando così una potenziale farfalla: Mercurio.

Le simulazioni iniziano inserendo i dati attuali sulle posizioni e le velocità dei pianeti. Ma raggiungere un'accuratezza del cento per cento è difficile. Perciò, ogni volta si introducono nella simulazione piccole modifiche nei dati. Per effetto della teoria del caos, un piccolo cambiamento potrebbe produrre grandi deviazioni nei risultati.

Per esempio, gli astronomi conoscono le dimensioni dell'ellisse dell'orbita di Mercurio con una precisione dell'ordine di alcuni metri. Laskar e Gastineau hanno eseguito 2501 simulazioni in cui hanno variato queste dimensioni di meno di un centimetro. Persino una perturbazione tanto piccola ha prodotto risultati incredibilmente diversi per il nostro sistema solare.

Potreste aspettarvi che, se il sistema solare fosse destinato a disintegrarsi, sarebbe a causa di uno dei grandi pianeti come Giove o Saturno. Ma le orbite di questi giganti gassosi sono estremamente stabili. Sono invece i pianeti rocciosi di tipo terrestre a creare problemi. Nell'un per cento delle simulazioni di Laskar e Gastineau, era il piccolo Mercurio a rappresentare il rischio più elevato per la stabilità del sistema. I modelli mostrano che l'orbita di Mercurio potrebbe cominciare a espandersi per una particolare risonanza con Giove, il che comporterebbe la possibilità di una collisione con il pianeta più prossimo a Mercurio, cioè Venere. In una delle simulazioni, una collisione

sfiorata tra i due pianeti era sufficiente a proiettare Venere fuori dalla sua orbita facendola scontrare con la Terra. D'altra parte, basterebbero incontri ravvicinati con altri pianeti per ottenere effetti mareali tanto distruttivi da avere un impatto disastroso per la vita sulla Terra.

Non si tratta di una semplice speculazione matematica astratta. Indizi di queste collisioni sono stati osservati nei pianeti che orbitano attorno alla stella binaria Upsilon Andromedae. Le strane orbite planetarie osservabili oggi trovano una spiegazione solo nell'espulsione di uno sfortunato pianeta in un momento della storia passata di questo sistema stellare binario. Prima che scappiate in montagna per mettervi in salvo, tuttavia, è bene che sappiate che secondo le simulazioni di Laskar e Gastineau ci vorranno miliardi di anni prima che Mercurio possa cominciare a comportarsi male.

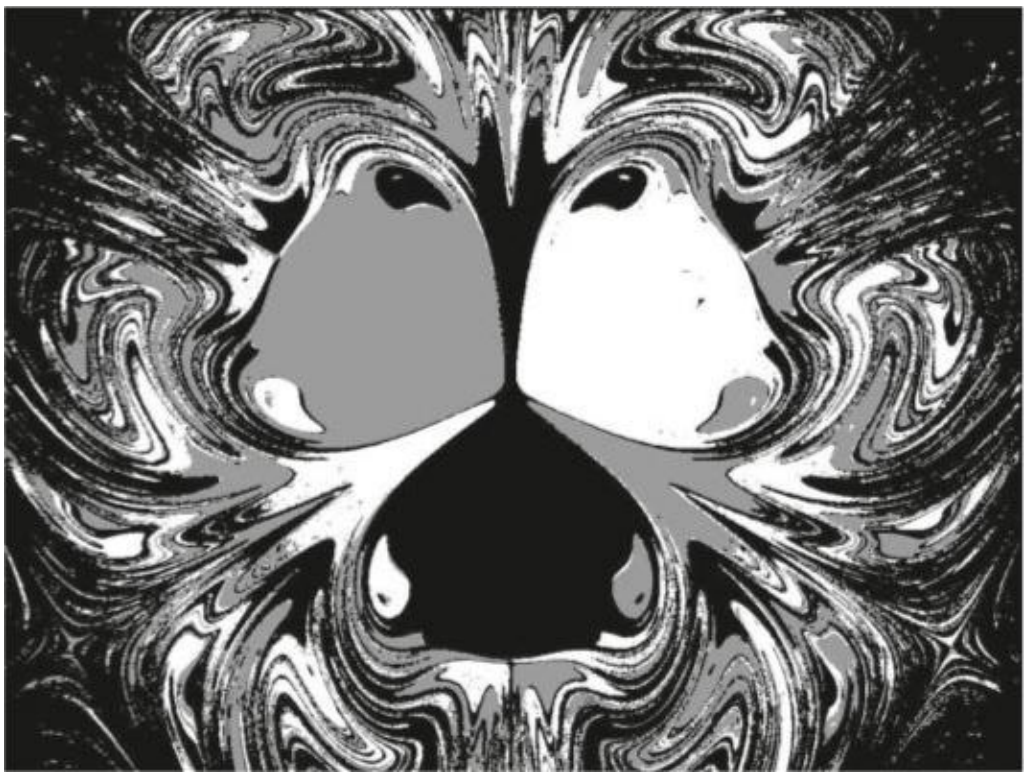
Complessità infinita

Che ne è dunque delle mie possibilità di predire l'esito del lancio del dado posato sulla mia scrivania? Laplace avrebbe sostenuto che, a patto di conoscere le dimensioni del dado, la distribuzione dei suoi atomi, la velocità a cui lo si lancia e le sue interrelazioni con l'ambiente circostante, almeno in teoria è possibile calcolare la sua posizione finale.

Le scoperte compiute da Poincaré e da coloro che gli sono succeduti hanno rivelato che una differenza di poche cifre decimali può determinare quella tra un risultato di 6 oppure di 2 nel lancio del dado. Il dado è costruito in modo tale per cui gli esiti possibili di un suo lancio sono solo sei, e tuttavia i dati da inserire nelle equazioni spaziano su uno spettro potenzialmente continuo di valori. Dunque devono esserci per forza dei punti in cui un cambiamento estremamente piccolo farà sì che il lancio del dado darà come esito 6 invece di 2. Ma qual è la natura di queste transizioni?

Le simulazioni al computer possono produrre rappresentazioni visive assai efficaci, in grado di fornirmi uno strumento utile a comprendere la sensibilità di vari sistemi alle condizioni iniziali. Accanto al mio dado da gioco tengo un classico giocattolo da tavolo con cui posso trastullarmi per ore. È costituito da un

pendolo metallico soggetto all'attrazione di tre calamite colorate di bianco, nero e grigio. L'analisi della dinamica di questo giocattolo ha portato a un'immagine che cattura il destino finale del pendolo per ciascuno dei punti della sua base quadrata da cui lo si mette in movimento. Coloriamo di bianco un punto se facendo partire il pendolo da lì esso finirà sulla calamita bianca. Analogamente, coloreremo il punto di grigio o di nero se la destinazione finale del pendolo sarà la calamita grigia oppure quella nera. Questa è l'immagine che otteniamo:



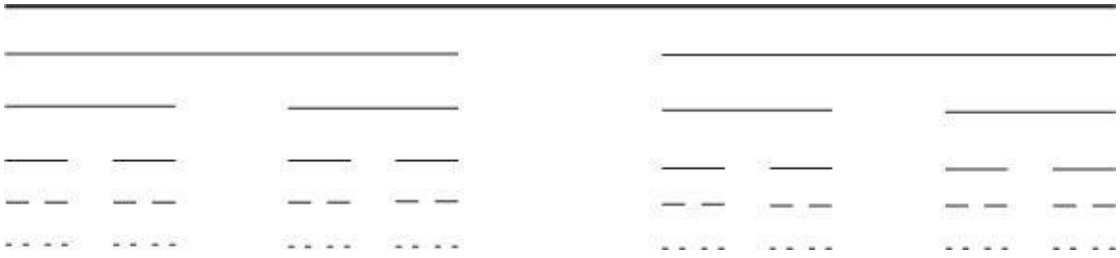
Come nel caso della dinamica di una popolazione, ci sono regioni dominate da una prevedibilità completa. Se facciamo partire il pendolo da una posizione vicina a una calamita, esso ne sarà attratto. Ma se mi sposto verso i bordi dell'immagine, mi ritrovo su un terreno molto meno prevedibile. Qui, in effetti, l'immagine è un esempio di frattale.

Ci sono aree in cui non esiste una semplice transizione dal bianco al nero. Continuando a ingrandire una di queste aree, l'immagine non si riduce mai a una regione riempita da un solo colore. C'è complessità su ogni scala di grandezza.

Si può ottenere una versione unidimensionale di questa immagine come segue. Disegnate una linea di lunghezza unitaria e coloratene metà di nero e metà di bianco. Quindi prendete il segmento lungo 0,5 unità che va dal punto 0,25 al punto 0,75 e

ribaltatelo. Poi prendete la metà centrale del segmento che avete appena ribaltato e ribaltatela di nuovo. Se procediamo in questo modo all'infinito, il comportamento previsto nei pressi del punto 0,5 risulta estremamente sensibile ai piccoli cambiamenti. Non esistono regioni contenenti il punto 0,5 con un solo colore.

Esiste una versione più complessa di questa rappresentazione. Partiamo di nuovo da una linea di lunghezza unitaria. Adesso cancelliamo il terzo centrale della linea. Ci resteranno due segmenti neri divisi da uno spazio bianco. Ora cancelliamo il terzo centrale di ciascuno dei due segmenti neri. Otterremo un segmento nero di lunghezza 1/9, un segmento bianco di lunghezza 1/9, un segmento nero di lunghezza 1/9, poi il segmento bianco di lunghezza 1/3 che avevamo cancellato nel primo passaggio e di nuovo la stessa sequenza di nero, bianco, nero ripetuta.



È molto probabile che abbiate indovinato come si procede da qui in avanti. Ogni volta cancelliamo il terzo centrale di tutti i segmenti neri che vediamo e ripetiamo quest'operazione all'infinito. L'immagine che ne risulta prende il nome di insieme di Cantor, in onore del matematico tedesco Georg Cantor, che incontreremo di nuovo nell'ultimo Confine, quando vi parlerò di ciò che possiamo sapere riguardo all'infinito. Supponete che l'insieme di Cantor controlli effettivamente il destino finale del pendolo nel mio gioco da scrivania. Se muovo il pendolo lungo questa linea, scopro che l'immagine predice un comportamento molto complicato in alcune aree.

Un calcolo piuttosto strano mostra che la lunghezza totale di tutti i segmenti cancellati è uguale a 1. Eppure ci sono dei puntini neri che non vengono mai cancellati: uno di questi è 1/4, un altro è 3/10. Questi punti neri, tuttavia, non sono isolati. Prendete un qualsiasi intervallo attorno a uno di tali punti e al suo interno troverete sempre un numero infinito di punti bianchi e neri.

Che aspetto hanno dunque le dinamiche del mio dado? Sono frattali e perciò impermeabili alla mia conoscenza? La mia ipotesi

iniziale era che il comportamento del dado fosse caotico. Tuttavia, ricerche recenti ci hanno riservato una sorpresa.

Conoscere il mio dado

Di recente, un team di ricercatori polacchi ha analizzato matematicamente il lancio di un dado e, combinando quest'analisi con l'utilizzo di videocamere ad alta velocità, ha scoperto che il comportamento del mio dado potrebbe non essere caotico e imprevedibile come temevo. Il gruppo di ricerca è composto da Tomasz e Marcin Kapitaniak, rispettivamente padre e figlio, da Jaroslaw Strzalko e da Juliusz Grabski, e opera a Łódź. Nell'articolo pubblicato sulla rivista «Chaos» nel 2012, il team ha inserito immagini simili a quelle relative al pendolo magnetico ma, rispetto alle due sole coordinate prese in considerazione nel caso del pendolo, la rappresentazione delle condizioni iniziali del lancio del dado sono più complicate, dato che devono descrivere anche l'angolo a cui viene rilasciato e la sua velocità. Il comportamento del dado risulterà prevedibile se, per la maggior parte dei punti di questa rappresentazione grafica, quando modifico leggermente le condizioni iniziali il dado finisce per mostrare la stessa faccia. Posso immaginare che la figura sia dipinta in sei colori diversi, corrispondenti alle sei facce del dado. L'immagine è frattale se, per quanto io ingrandisca la figura, continuerò a vedere aree che contengono almeno due colori. Il comportamento del dado è prevedibile se non vedo questa frattalità della figura.

Nel modello analizzato dal team polacco si ipotizza che il dado sia perfettamente equilibrato, come quello che mi sono portato a casa da Las Vegas. La resistenza dell'aria può essere ignorata, poiché i suoi effetti sul dado in volo sono estremamente ridotti. Quando il dado colpisce il tavolo, una certa frazione della sua energia viene dissipata, cosicché dopo un numero sufficiente di rimbalzi il dado avrà perso tutta la sua energia cinetica e si fermerà.

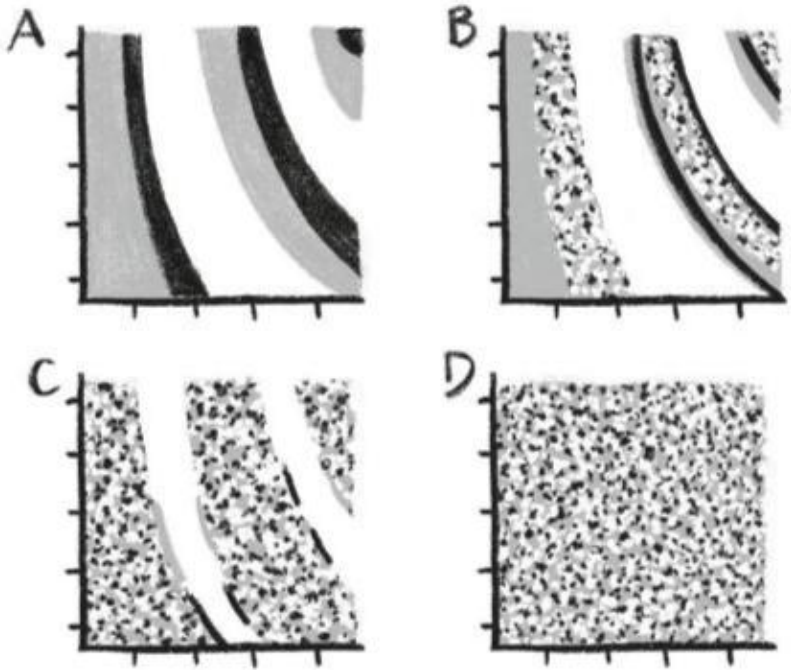
Anche l'attrito del tavolo è un elemento da tenere in considerazione, è infatti probabile che il dado scivoli durante i primi rimbalzi ma non nei successivi. Tuttavia, nel modello studiato dai ricercatori polacchi si ipotizza che la superficie fosse

priva d'attrito dato che la dinamica del sistema diventa troppo difficile da maneggiare in presenza di attrito. Perciò dobbiamo immaginare di lanciare il dado su una pista di pattinaggio su ghiaccio.

Io avevo già scritto le equazioni basate sulle leggi del moto di Newton per la dinamica del dado che vola nell'aria. Nelle mani del team polacco queste equazioni si sono rivelate non troppo complicate. Sono le equazioni che danno conto del cambiamento dinamico dopo l'impatto con il tavolo a essere terribili: occupano dieci righe dell'articolo dei ricercatori polacchi.

Hanno scoperto che se la quantità di energia dissipata nell'impatto col tavolo è molto alta, la rappresentazione grafica degli esiti del lancio non ha una qualità frattale. Ovvero, se sono in grado di stabilire le condizioni di partenza con una precisione adeguata, l'esito del lancio del mio dado è prevedibile e ripetibile. Da questa prevedibilità discende che, più spesso che no, il dado atterrerà sulla faccia che si trovava nella posizione inferiore prima del lancio. A quanto pare, un dado che è equo quando è statico può effettivamente perdere questa caratteristica quando vi si aggiunge la sua dinamica.

Tuttavia man mano che il tavolo diventa più rigido, cioè tale per cui la dissipazione di energia si riduce mentre aumenta il numero di rimbalzi compiuti dal dado, comincerò a vedere emergere una qualità frattale nella figura.



Passando da A a D, il tavolo dissipa sempre meno energia, e ciò dà come risultato una più spiccata qualità frattale nell'esito del lancio.

Nella figura sopra riprodotta, sono due i parametri che variano: l'altezza da cui viene lasciato cadere il dado e la sua velocità angolare attorno a un asse. Minore è l'energia dissipata nell'impatto con il tavolo, più l'esito del lancio sembra tornare nelle mani degli dèi.

Dio gioca a dadi?

Torniamo al tentativo di definire Dio come tutto ciò che non possiamo conoscere. Secondo la teoria del caos io non sono in grado di conoscere il futuro di certi sistemi di equazioni perché sono troppo sensibili a piccole imprecisioni. Nel passato gli dèi non erano intelligenze soprannaturali che vivevano al di fuori del sistema, bensì i fiumi, il vento, il fuoco, la lava – entità i cui comportamenti non potevano essere previsti né controllati. La matematica del Novecento ci ha rivelato che queste divinità sono ancora tra noi. Esistono fenomeni naturali che non potranno mai essere addomesticati né conosciuti. La teoria del caos ci suggerisce che spesso i nostri possibili futuri non sono conoscibili perché dipendono dall'esatta situazione del presente. E siccome noi non possiamo mai avere una conoscenza completa del

presente, la teoria del caos ci nega l'accesso al futuro. Almeno finché questo non diventa presente.

Con questo non intendo dire che tutti i futuri siano inconoscibili. Molto spesso ci troviamo in aree non caotiche e in cui piccole fluttuazioni non hanno grandi effetti sugli esiti futuri. È per questo che la matematica si è rivelata uno strumento tanto potente per prevedere e pianificare. In questi casi possediamo una conoscenza dell'avvenire. Ma altre volte non possiamo avere lo stesso grado di controllo, anche se prima o poi quel futuro a noi ignoto inciderà sicuramente sulla nostra esistenza.

Alcuni esperti di religione che tentano di spiegare scientificamente il modo in cui un'intelligenza soprannaturale potrebbe intervenire nel mondo hanno avuto l'idea interessante di utilizzare il vuoto di conoscenze che il caos offre come spazio per l'intervento di una tale intelligenza soprannaturale sul futuro.

Uno di questi scienziati credenti è il fisico quantistico John Polkinghorne. Polkinghorne, che insegna all'Università di Cambridge, è un raro caso di intellettuale in cui il rigore di una formazione scientifica si combina con gli anni di studio impiegati per diventare un pastore anglicano. Lo incontreremo di persona nel Terzo Confine, quando esplorerò l'inconoscibilità insita nella fisica quantistica, ovvero nel suo campo di specializzazione. Tuttavia Polkinghorne si è anche interessato del vuoto di conoscenza che la matematica del caos offre al suo Dio come opportunità per influenzare il corso futuro dell'umanità.

Secondo la tesi da lui proposta, è attraverso le indeterminatezze implicite nella teoria del caos che un'intelligenza soprannaturale può intervenire nel mondo senza violare le leggi della fisica. La teoria del caos afferma che non possiamo mai conoscere le condizioni iniziali con una precisione tale da permetterci di eseguire equazioni deterministiche. Di conseguenza, per Polkinghorne, c'è spazio per un intervento divino che metta a punto le cose in maniera che rimangano coerenti con la nostra conoscenza parziale ma possa influire sugli esiti futuri.

Polkinghorne è attento a sottolineare che l'uso di dati infinitesimali per modificare gli effetti richiede un intervento completamente olistico dall'alto in basso. Il suo Dio non si nasconde nei dettagli, ma è necessariamente onnisciente. Poiché la teoria del caos prevede che persino la posizione di un elettrone all'estremità opposta dell'universo possa influenzare l'intero

sistema, occorre una conoscenza completa, olistica del sistema – dell'intero universo – per dirigere gli eventi. Non possiamo isolare una parte dell'universo e sperare di riuscire a fare previsioni basate su quella parte. Perciò è necessaria una conoscenza del tutto per intervenire attraverso questo spiraglio in ciò che ci è ignoto.

La teoria del caos è deterministica, perciò in questo caso non si tratta di un tentativo di sfruttare la casualità insita in qualcosa come la fisica quantistica per esercitare un'influenza. L'idea di Polkinghorne sul modo di far quadrare il cerchio del determinismo e influenzare il sistema è lo sfruttamento dello spazio vuoto che divide epistemologia e ontologia, ciò che sappiamo e ciò che è vero. Non potendo arrivare a una completa descrizione dello stato dell'universo in questo momento, ne consegue che dalla nostra prospettiva non c'è determinatezza. Esistono molti scenari distinti che coincidono con la nostra descrizione imparziale di ciò che conosciamo attualmente sullo stato dell'universo. Polkinghorne sostiene che ciò offra a Dio l'opportunità di intervenire in qualsiasi momento per spostare il sistema da uno all'altro di tutti i possibili scenari senza che noi ci rendiamo conto dello spostamento. Ma, come abbiamo visto, la teoria del caos comporta che questi piccoli spostamenti possano condurre a conseguenze enormemente diverse. Polkinghorne è ben attento a puntualizzare che gli unici spostamenti permessi sono quelli in cui c'è solo una modifica dell'informazione, non dell'energia. La regola è non violare le leggi della fisica. Come dice Polkinghorne, «il succedersi delle stagioni e l'alternanza tra notte e giorno non saranno invalidate».

Anche se pensate che sia piuttosto fantasioso (e io certamente lo penso), questo genere di principio è probabilmente fondamentale per la nostra sensazione di poter intervenire nella realtà. La questione del libero arbitrio ha a che fare in ultima analisi con questioni di filosofia riduzionistica. Il libero arbitrio descrive l'incapacità di compiere una qualsiasi riduzione significativa che nella maggior parte dei casi porta a una visione atomistica del mondo. Perciò ha senso creare una narrazione in cui noi siamo dotati di libero arbitrio, dato che è così che appaiono le cose al livello del ruolo dell'uomo nell'universo. Se le cose fossero evidentemente deterministiche, con poche varianti di piccoli cambiamenti impercettibili, noi non penseremmo di essere dotati di libero arbitrio.

Colpisce il fatto che Newton, che ci ha indotti a credere in un universo meccanico e deterministico, pensasse anche che nelle equazioni ci fosse spazio per l'intervento divino. Scrisse infatti di ritenere che talvolta Dio, quando sembrava che le cose si allontanassero dalla rotta stabilita, dovesse ripristinare il buon funzionamento dell'universo. Su questo punto ebbe un duro scontro con il matematico tedesco Gottfried Leibniz, suo grande antagonista, il quale non capiva perché Dio non avesse creato un universo perfetto fin dall'inizio:

> Sir Isaac Newton e i suoi seguaci hanno una ben strana opinione riguardo all'opera di Dio. Secondo la loro dottrina, Dio onnipotente ha bisogno di caricare il suo orologio di tanto in tanto, perché altrimenti si fermerebbe. A quanto pare Egli non sarebbe stato abbastanza previdente da imprimergli un moto perpetuo.

Sul confine del caos

Newton e la sua matematica mi davano la sensazione di poter conoscere il futuro ed eliminare l'attesa che lo porta a diventare presente. Il gran numero di volte in cui ho sentito ripetere la citazione di Laplace sulla possibilità per l'uomo di arrivare a conoscere ogni cosa grazie alle equazioni del moto è la testimonianza di una convinzione generale condivisa dagli scienziati: che l'universo sia teoricamente conoscibile.

La matematica del Novecento ci ha rivelato che la teoria non necessariamente si traduce in pratica. Anche se Laplace avesse ragione nell'affermare che una conoscenza completa dello stato attuale dell'universo insieme alle equazioni della matematica dovrebbe portarci a una conoscenza completa del futuro, io non avrò mai accesso a una tale conoscenza completa. La rivelazione sconvolgente della teoria del caos nel Novecento è che anche un'approssimazione di quella conoscenza non ci può essere d'aiuto. Le traiettorie divergenti che le palle tracciano sul tavolo da biliardo caotico ci dicono che, poiché non possiamo mai sapere su quale traiettoria siamo, il nostro futuro non è prevedibile.

La teoria del caos implica che ci sono cose che non potremo mai sapere. La matematica in cui avevo riposto tanta fiducia pensando che mi avrebbe dato una conoscenza completa mi ha rivelato l'opposto. Ma la situazione non è disperata. In molti casi le equazioni non sono sensibili ai piccoli cambiamenti e allora mi danno accesso a predizioni sul futuro. In fondo, è così che

abbiamo fatto atterrare una sonda su una cometa di passaggio. E non solo: come illustra il lavoro di Bob May, la matematica può anche aiutarmi a sapere quando non posso sapere.

Tuttavia, una scoperta compiuta alla fine del Novecento mette in dubbio anche il cardine centrale laplaciano della prevedibilità teorica del futuro. All'inizio degli anni Novanta uno studente di dottorato di nome Zhihong Xia dimostrò che si possono configurare cinque pianeti in modo tale per cui, quando li si lascia andare, l'attrazione gravitazionale reciproca fa sì che uno di essi voli via e raggiunga una velocità infinita in un tempo finito. Non c'è alcuna collisione tra pianeti, eppure le equazioni contengono al loro interno questo esito catastrofico per gli abitanti dello sfortunato pianeta. Le equazioni non sono in grado di fare alcuna predizione su ciò che avviene oltre quel punto.

La scoperta di Xia rappresenta un'obiezione sostanziale all'idea di Laplace secondo cui dalle equazioni di Newton segue che possiamo conoscere il futuro se abbiamo una completa conoscenza del presente, perché non c'è alcuna predizione, nemmeno all'interno delle equazioni newtoniane, per ciò che accadrà a quello sfortunato pianeta una volta raggiunta una velocità infinita. In quel punto la teoria si imbatte in una singolarità, e oltre quel punto una predizione non ha più senso. Come vedremo nei Confini successivi, alcune considerazioni di relatività pongono un freno alla possibilità che si arrivi realmente a tale singolarità, dato che alla fine lo sfortunato pianeta raggiungerà il limite cosmico rappresentato dalla velocità della luce, e a quel punto scopriamo che la teoria di Newton è solo un'approssimazione della realtà. Nondimeno, ciò ci rivela che le equazioni non sono sufficienti a conoscere il futuro.

È sorprendente ascoltare Laplace sul letto di morte. Quando vede la propria singolarità avvicinarsi e sa che gli rimane solo una quantità di tempo finita, anche lui deve arrendersi: «Ciò che sappiamo è poca cosa, ciò che ignoriamo è immenso». Il Novecento ci ha rivelato che, anche se sappiamo molto, la nostra ignoranza rimarrà immensa.

Ma a quanto pare non è solo il comportamento visibile dei pianeti e dei dadi a essere inconoscibile. Sondare in profondità l'interno del mio dado da gioco porta alla luce un'ulteriore obiezione alla fede di Laplace in un universo meccanico deterministico. Quando gli scienziati cominciarono a guardare

dentro il dado per capire di che cosa fosse fatto, scoprirono che conoscere la posizione e il movimento delle particelle che lo compongono probabilmente non era possibile nemmeno in teoria. Come scoprirò nei prossimi due Confini, potrebbe effettivamente essere un gioco di dadi a controllare il comportamento delle stesse particelle di cui è composto il dado rosso di Las Vegas.

Secondo Confine: il violoncello

3

«Ogni uomo considera i limiti della propria visione personale come i limiti del mondo.»

ARTHUR SCHOPENHAUER

All'inizio delle superiori, il mio insegnante di musica chiese alla classe se qualcuno di noi voleva imparare a suonare uno strumento. Alzammo la mano in tre, e il professore ci accompagnò nel ripostiglio per vedere che cosa avessimo a disposizione. L'armadio era in pratica vuoto, fatta eccezione per tre trombe impilate una sopra l'altra.

«Mi sa che imparerete a suonare la tromba.»

Non mi pento della scelta (come se ce ne fosse stata una…). Negli anni successivi, mi sarei divertito un sacco a suonare nella banda del paese e a scherzare con gli ottoni dell'orchestra della contea mentre contavamo la durata delle nostre pause. Tuttavia, guardavo con un po' d'invidia gli archi per come sembravano suonare sempre, eseguendo tutti i passaggi migliori. Qualche anno fa, durante un'intervista alla radio mi chiesero quale strumento musicale avrei scelto se avessi potuto impararne uno nuovo e quali pezzi mi sarebbe piaciuto suonare.

«Il violoncello. E le suite di Bach.»

In seguito, tornai spesso a rimuginare su quella domanda. Volevo sapere se sarei stato davvero in grado di imparare a suonare quelle splendide suite. Forse era troppo tardi per acquisire abilità totalmente nuove. Dovevo avere una risposta e così, alla fine, mi decisi a comprare un violoncello.

È qui davanti a me mentre scrivo dei tentativi di predire il risultato del lancio del dado. Quando sono stanco di analizzare le equazioni che regolano la caduta del dado rosso sulla mia scrivania e ho bisogno di una pausa, mi metto a massacrare una delle ighe della prima suite per violoncello. Bach si rivolterà senz'altro nella tomba, ma a me piace moltissimo.

Una delle cose divertenti nel violoncello è la possibilità di far scorrere il dito lungo la corda creando un glissando continuo di note. Sulla mia tromba sarebbe impossibile ottenere un effetto del genere: è uno strumento di note discrete, corrispondenti alle diverse combinazioni di tasti che vengono premuti. Come vedremo ora, questa tensione fra il glissando continuo del violoncello e le note discrete della tromba ha qualcosa da insegnarci anche riguardo ai tentativi di predire il comportamento di un dado.

Uno sguardo al microscopio

Per predire in che modo potrebbe cadere il mio dado, devo sapere di che cosa è composto: se, per esempio, in un angolo l'acetato fosse più denso, una delle sue facce risulterebbe favorita rispetto alle altre. Così, se vogliamo applicare le leggi di Newton al lancio di un dado, dobbiamo innanzitutto chiederci com'è fatto: è davvero una struttura continua oppure, se lo osserviamo più da vicino, risulta composto da parti discrete?

Se mi fermo ai limiti della mia visione considerandoli come i limiti del mondo (secondo la citazione di Schopenhauer riportata in apertura), non posso vedere nient'altro che la liscia superficie rossa dell'acetato di cui è fatto il dado. Grazie a un microscopio ottico, possiamo ingrandire il dado di un fattore 1500, portandolo alle dimensioni di un grosso edificio. Tuttavia, anche l'osservazione di questo gigantesco dado non ci rivela molto sui segreti della sua struttura: su tale scala, infatti, la sua materia appare ancora pressoché omogenea e continua.

Nel Novecento, i microscopi che sfruttano diverse parti dello spettro elettromagnetico hanno consentito agli scienziati di creare delle immagini che ingrandiscono le cose mille volte di più: in questo modo, il nostro dado arriverebbe ad avere le dimensioni di Londra. Osservato a questo ingrandimento, appare più granuloso: il senso di continuità della sua struttura cede il passo a qualcosa di più discreto. Gli odierni microscopi elettronici ci permettono di ingrandirlo di altre dieci volte: a questo punto, potremmo iniziare a scorgere gli atomi di carbonio e ossigeno che, come sappiamo, sono tra gli elementi di cui è composto l'acetato del nostro dado.

La cosa interessante è che gli scienziati avevano già formulato una visione atomica della materia molto tempo prima che fosse possibile vedere questi atomi sotto i microscopi moderni (come quelli dei laboratori che si trovano di fronte al dipartimento di matematica). E la via migliore per scoprire di che cosa è fatto il nostro dado consiste nell'adottare una prospettiva teorica e matematica in combinazione con una visione fisica.

È però emerso che gli atomi come il carbonio e l'ossigeno non sono poi così atomici come il loro nome suggerirebbe. Oltre la struttura atomica rivelata dagli odierni microscopi elettronici ce n'è infatti una più interna, dove gli atomi lasciano il posto a elettroni, protoni e neutroni; e protoni e neutroni, a loro volta, cedono poi il campo ai quark. Nel 2013, i microscopi quantistici hanno addirittura catturato immagini degli elettroni che orbitano attorno ai nuclei degli atomi di idrogeno. Ma esiste un limite teorico a questa nostra discesa sempre più in profondità nella struttura del nostro dado?

Che cosa succede, per esempio, se prendo il mio dado e continuo a dividerlo a metà? Fino a dove posso spingermi? Il mio lato matematico mi dice che non c'è nessun problema perché, se ho un numero, posso sempre continuare a dividerlo per due:

$$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \ldots$$

Dal punto di vista matematico, non c'è un punto dove dovrei fermarmi. Tuttavia, se voglio procedere in questo modo con il

dado fisico che tengo sulla mia scrivania e continuo a tagliarlo a metà, fino a dove posso arrivare?

La tensione fra la natura continua e discreta della materia, tra ciò che è possibile in termini matematici e i limiti posti dalla realtà fisica, è una lotta che si protrae da millenni. L'universo, insomma, danza al suono della mia tromba o vibra al glissando del mio violoncello?

La musica delle sfere

Su che cosa si basa la mia conoscenza personale di questi elettroni e di questi quark, ritenuti gli elementi costitutivi ultimi del mio dado? Io non li ho mai visti. Se mi chiedo come faccio a conoscerli, devo rispondere che si tratta di una cosa che ho letto e mi sono sentito ripetere così tante volte da darla per scontata, dimenticandomi perché le cose stanno così e come faccio a saperlo. O, a pensarci bene, mi è mai stato detto come facciamo a saperlo? È un po' come per l'Everest: so che è la montagna più alta del mondo solo perché l'ho sentito ripetere un sacco di volte. Così, prima di chiederci se c'è qualcosa oltre questo strato della realtà, dobbiamo verificare come siamo giunti a questi elementi costitutivi.

Rileggendo la storia, trovo sorprendente che solo poco più di un secolo fa si siano trovate prove convincenti del fatto che le cose come il mio dado sembrino costituite da elementi fondamentali discreti detti atomi, e che non siano strutture continue. Tuttavia, pur trattandosi di una scoperta recente, l'intuizione che le cose stessero così era già stata formulata migliaia di anni fa. In India si credeva che la materia fosse composta di atomi basilari corrispondenti al gusto, all'odore, al colore e al tatto. Gli atomi erano poi suddivisi in due gruppi: quelli infinitamente piccoli, che non occupavano nessuno spazio, e altri «grossolani», che riempivano uno spazio finito (una teoria quasi profetica, come vedrete quando spiegherò il nostro attuale modello della materia).

In Occidente furono gli antichi greci a proporre per primi una filosofia atomistica della natura, sostenendo la visione

riduzionista secondo cui la realtà fisica poteva essere ricondotta a unità fondamentali da cui era composta ogni cosa materiale. Questi atomi non potevano essere scissi in elementi più piccoli e le loro proprietà non dipendevano da una qualche struttura interna complessa. Una delle radici della convinzione che l'universo fosse costituito da elementi fondamentali indivisibili era la dottrina filosofica pitagorica che poneva il numero al centro della spiegazione dei segreti dell'universo.

La straordinaria importanza data ai numeri interi traeva origine da una fondamentale scoperta attribuita a Pitagora, ossia che il numero è la base dell'armonia musicale (sfruttata tanto dal mio violoncello quanto dalla mia tromba). Narra la leggenda che l'ispirazione a indagare il rapporto fra la matematica e la musica gli fosse venuta passando accanto alla fucina di un fabbro e sentendo i martelli produrre una combinazione di note armoniose colpendo il metallo. (Non possiamo stabilire la veridicità di questa e altre storie su Pitagora; anzi, in realtà non sappiamo neppure se sia davvero esistito o se la sua figura non sia piuttosto un'invenzione delle generazioni successive per promuovere nuove idee.)

Tornato a casa – prosegue la leggenda – Pitagora si mise a fare esperimenti con le note emesse da uno strumento a corde. Sul mio violoncello, posso produrre una sequenza continua di note prendendo la corda vibrante e risalendo gradualmente con il dito verso il ponticello; in questo modo, vengo a creare un effetto sonoro chiamato glissando (nel seguente Confine, però, ci chiederemo se quella così prodotta sia davvero una sequenza continua di note). Se mi fermo in corrispondenza delle posizioni che producono delle note in armonia con quella della corda vibrante libera, posso vedere che fra le lunghezze delle corde c'è un rapporto esprimibile perfettamente in termini di numeri interi.

Per esempio, ponendo il dito a metà della corda vibrante, ottengo una nota che suona quasi identica a quella da cui sono partito. L'intervallo è chiamato ottava e all'orecchio umano la nota suona talmente simile a quella della corda libera che nella notazione musicale hanno il medesimo nome. Se tengo il dito a un terzo della distanza dalla testa del violoncello, ottengo una nota che suona particolarmente armoniosa in

combinazione con quella della corda libera, conosciuta come la quinta giusta; ciò a cui il nostro cervello risponde è un riconoscimento, a livello subliminale, del rapporto fra le lunghezze d'onda di queste due note, esprimibile con numeri interi.

Dopo aver scoperto che i numeri interi erano al cuore dell'armonia musicale, i pitagorici iniziarono a elaborare un modello dell'universo in cui questi numeri divenivano gli elementi fondamentali di tutto ciò che poteva essere visto o sentito. La cosmologia greca era dominata dall'idea di un'armonia matematica presente nei cieli: si credeva che tra le orbite dei pianeti ci fosse un rapporto matematico perfetto, idea da cui nacque quindi la teoria della musica delle sfere.

Si riteneva inoltre (cosa più importante ai fini della comprensione della natura fisica del mio dado) che la chiave per capire la costituzione della materia fossero i numeri discreti, e non un glissando continuo. I pitagorici avanzarono l'idea secondo cui gli atomi fondamentali potevano sommarsi fra di loro, come i numeri, dando origine a nuova materia. Il filosofo e matematico greco Platone sviluppò la teoria di matrice pitagorica per cui la materia è formata da unità indivisibili, assimilabili a elementi geometrici discreti.

Platone riteneva che gli atomi fossero di fatto costituiti da enti matematici: triangoli e quadrati. Questi ultimi rappresentavano infatti i mattoni di quelle figure geometriche che, a suo avviso, erano la chiave dei quattro elementi, ossia gli ingredienti fondamentali della chimica greca: fuoco, terra, aria e acqua. Secondo Platone, ognuno di essi aveva una propria forma matematica tridimensionale.

Il fuoco era una piramide a base triangolare, o tetraedro, formata da quattro triangoli equilateri. La terra aveva la forma di un cubo, come il mio dado. L'aria era un ottaedro formato da otto triangoli equilateri (una figura che può essere rappresentata come l'unione di due piramidi a base quadrata congiunte lungo le loro basi). L'acqua, infine, corrispondeva all'icosaedro, una figura formata da venti triangoli equilateri. Platone era convinto che fosse l'interazione geometrica tra

queste forme fondamentali a dare origine alla chimica degli elementi.

Nel mondo antico, comunque, la visione atomistica della materia non era accettata da tutti. In fin dei conti, non c'erano prove dell'esistenza di questi mattoni indivisibili, non osservabili. Aristotele era uno dei pensatori che non credevano all'idea degli atomi fondamentali. Riteneva che in natura gli elementi fossero continui, vale a dire che in linea teorica sarebbe possibile continuare a dividere il mio dado in parti sempre più piccole. Pensava che fuoco, terra, aria e acqua fossero realtà elementari nel senso che non potevano essere scissi in «corpi dalla forma differente»: continuando a dividere l'acqua o l'aria, otterremo sempre acqua o aria. Dopo tutto, se prendiamo un bicchier d'acqua, all'occhio umano appare come una struttura continua, teoricamente divisibile all'infinito. Se prendo un pezzo di gomma, posso allungarlo in modo uniforme ottenendo una striscia che appare continua nella sua natura. Si erano così gettate le basi per la millenaria disputa tra il modello continuo e quello discreto della materia: il glissando contro le note discrete della scala musicale, il violoncello contro la tromba.

È interessante notare che sarebbe stata proprio una scoperta accreditata ai pitagorici a minacciare la visione atomistica e a far pendere per molti anni l'ago della bilancia dalla parte della convinzione che la materia fosse divisibile all'infinito.

Numeri ai confini

Stando alla prospettiva atomistica, se traccio due linee su una pagina, ognuna di esse sarà formata da un certo numero di questi atomi indivisibili; di conseguenza, il rapporto fra le loro lunghezze sarà esprimibile in numeri interi, corrispondenti al numero di atomi costitutivi di ciascuna linea. In realtà, però, le cose non sono così ordinate. Di fatto, fu proprio il teorema di Pitagora sui triangoli rettangoli a mostrare che nel mondo della geometria possono anche esserci linee le cui lunghezze relative non sono esprimibili attraverso semplici frazioni.

In realtà, già le stesse dimensioni del mio dado nascondono una sfida alla visione atomistica della natura. Prendiamo due spigoli del cubo che si incontrano formando un angolo di 90 gradi; le loro lunghezze sono uguali. Consideriamo ora la diagonale che attraversa la faccia del cubo completando il triangolo che ha come altri due lati questi spigoli: quale sarà la sua lunghezza in rapporto a quella dei lati più corti?

Il teorema di Pitagora sui triangoli rettangoli afferma che il quadrato della lunghezza della diagonale equivale alla somma dei quadrati delle lunghezze dei due lati minori. Pertanto, se poniamo la lunghezza di uno degli spigoli del cubo come uguale a 1, in base al teorema di Pitagora avremo che la lunghezza della diagonale che attraversa la faccia del dado è un numero il cui quadrato è uguale a 2. E qual è questo numero?

I babilonesi avevano raccolto la sfida di calcolare questo valore. Una tavoletta risalente all'antico periodo babilonese (1800-1600 a.C.), custodita presso l'Università di Yale, stima che tale lunghezza, espressa nel sistema sessagesimale (a base 60), dovrebbe essere:

$$1+\frac{24}{60}+\frac{51}{60^2}+\frac{10}{60^3}=\frac{30.547}{21.600}$$

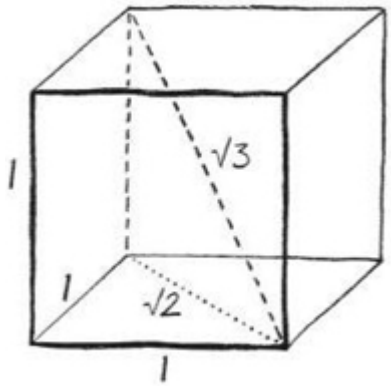
che, nella notazione decimale, corrisponde a 1,41421296296…, dove il 296 si ripete all'infinito. Tutte le frazioni, quando vengono scritte come decimali, a un certo punto si ripetono; di fatto, ogni espansione decimale che si ripete può sempre essere scritta sotto forma di frazione. Il calcolo babilonese ha una precisione impressionante: è corretto al sesto decimale. Ciononostante, se eleviamo al quadrato questa frazione, il risultato non sarà comunque 2. Come dimostrarono gli antichi greci, malgrado tutti i loro sforzi di calcolo, gli scribi babilonesi non avrebbero mai potuto trovare una frazione che, elevata al quadrato, desse come risultato 2.

La scoperta che i tentativi dei babilonesi erano destinati al fallimento è accreditata a uno dei membri della scuola pitagorica, Ippaso, il quale dimostrò che la lunghezza della

diagonale della faccia di un cubo di lato unitario non può mai essere espressa sotto forma di frazione.

Il teorema di Pitagora sui triangoli rettangoli implicava che la diagonale di un quadrato di lato unitario doveva avere una lunghezza uguale alla radice quadrata di due volte la lunghezza del lato; ora, quello che Ippaso riuscì a dimostrare è proprio che non esiste nessuna frazione il cui quadrato sia esattamente pari a 2. La dimostrazione sfrutta una tecnica classica dell'armamentario matematico: la prova per assurdo. Ippaso parte dall'assunzione che esista una frazione il cui quadrato è 2; tuttavia, attraverso una serie di abili manipolazioni, questo assunto conduce sempre al risultato contraddittorio che c'è un numero che è insieme pari e dispari. L'unico modo per evitare tale contraddizione sta quindi nell'ammettere che l'assunzione originaria dev'essere falsa, ossia che non può esistere nessuna frazione il cui quadrato sia pari a 2.

I suoi compagni pitagorici rimasero sbigottiti dalla scoperta che i loro splendidi triangoli rettangoli nascondessero lunghezze così disarmoniche. La setta fece voto di silenzio e si narra che, quando Ippaso lasciò trapelare la notizia, lo annegarono in mare per aver rivelato che nel mondo fisico si celava una simile disarmonia. Tuttavia, l'esistenza di questi nuovi numeri – chiamati «irrazionali» perché non sono esprimibili nella forma di un rapporto (*ratio*) fra numeri interi – non poteva essere tenuta facilmente segreta.



Lunghezze irrazionali in un cubo.

Io ho la chiara sensazione che questa lunghezza esista: è la distanza tra i due angoli opposti di una faccia del mio dado e posso vederla su un righello accostato al lato lungo del

triangolo. Tuttavia, se provo a scrivere questo numero come un decimale infinito, non riesco mai a catturarlo: inizia con 1,414213562… e poi continua all'infinito senza mai ripetersi.

Un'irrazionale esuberanza

La scoperta, da parte degli antichi greci, dell'esistenza di lunghezze che non potevano essere espresse come semplici rapporti di numeri interi spinse i matematici dell'epoca a creare una nuova matematica, la matematica dei numeri irrazionali, che consentisse loro di prendere le autentiche misure dell'universo. Oltre alla diagonale del quadrato, anche altre grandezze fondamentali – come π, ossia la circonferenza di un cerchio di diametro unitario – si sarebbero rivelate irrazionali; tuttavia, se l'irrazionalità della radice quadrata di 2 era già nota ai greci duemila anni fa, la dimostrazione dell'impossibilità di esprimere π sotto forma di frazione sarebbe stata trovata soltanto nel Settecento dal matematico svizzero Johann Heinrich Lambert.

Nonostante la mia avversione per le cose che non possiamo conoscere, la scoperta dei numeri che non possono essere catturati attraverso semplici rapporti di numeri interi, o frazioni, fu uno dei momenti che accesero in me l'amore per la matematica. Lo stesso anno in cui il mio insegnante di musica mi introdusse alla tromba, il mio professore di matematica mi presentò la dimostrazione dell'irrazionalità della radice quadrata di 2. Era contenuta in uno dei libri che mi aveva consigliato per farmi appassionare alla matematica. Il suo piano riuscì alla perfezione: rimasi sbalordito vedendo come fosse possibile dimostrare, attraverso un'argomentazione logica sviluppata in un numero finito di passi, che soltanto l'infinito può articolare la misura di una lunghezza come la diagonale di un quadrato. Data l'impossibilità di scrivere per esteso questa lunghezza, la cosa migliore possibile era sapere perché non potevo conoscere questo numero.

In seguito imparai che ci sono dei modi alternativi di esplorare questi numeri irrazionali – e che quindi, forse, sono

anch'essi dei numeri che possiamo conoscere. Esistono alcune espressioni infinite dove ricorrono degli schemi che rendono tali numeri meno misteriosi. Per esempio,

$$\sqrt{2} = 2 \times \left(1 - \frac{1}{3}\right) \times \left(1 + \frac{1}{5}\right) \times \left(1 - \frac{1}{7}\right) \times \left(1 + \frac{1}{9}\right) \times \ldots$$

o

$$\pi = 4 \times \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \cdots\right)$$

La scoperta di queste espressioni può essere vista come un tentativo di ricondurre i numeri irrazionali nel regno del conosciuto. Una frazione è un numero la cui espansione decimale, a partire da un certo punto, si ripete periodicamente. Ora, non sarebbe possibile considerare anche queste espressioni come uno schema, non troppo diverso dal periodo che ricorre nell'espansione decimale di una frazione? Il periodo che si ripete nell'espansione di una frazione indica che esistono due numeri il cui rapporto cattura il numero in questione, mentre nel caso di $\sqrt{2}$ e π devo comunque rassegnarmi al fatto che per definire tali lunghezze irrazionali servono infiniti numeri. Il problema se la finitezza di un oggetto sia o meno un requisito necessario per la sua conoscenza continuerà a perseguitarmi per tutto il mio viaggio ai confini dell'ignoto.

Certo, ai fini delle applicazioni pratiche di questi numeri potremmo probabilmente cavarcela con un'approssimazione esprimibile in forma frazionaria. Per quanto riguarda π, la maggior parte degli ingegneri si accontentano di usare il valore di 22/7, ottenuto da Archimede approssimando un cerchio con un poligono di 96 lati. In effetti, mi basta conoscere 39 cifre di π per poter calcolare la circonferenza di un cerchio dalle dimensioni pari a quelle dell'universo osservabile con una precisione dell'ordine della grandezza di un atomo di idrogeno. Esiste persino una formula in grado di dirmi qual è la milionesima cifra di π senza calcolare tutti i decimali precedenti. Non che abbia un disperato bisogno di saperlo, comunque. E, in ogni caso, detta formula mi darà soltanto una conoscenza finita di un numero che necessita dell'infinito per essere abbracciato completamente.

La scoperta di questi numeri sembrava implicare un'infinita divisibilità dello spazio: solo dividendo lo spazio all'infinito, infatti, sarei in grado di misurare le precise dimensioni del mio semplice cubo. Questa rivelazione fece sì che, in Occidente, la visione di Aristotele sulla continuità della materia rimanesse dominante fino al Rinascimento.

L'armonia di minuscole sfere

Con le intuizioni scientifiche della generazione di Newton e di quelle successive, le cose volsero in favore della visione secondo cui l'universo è formato da elementi costitutivi basilari. Uno dei contemporanei di Newton, Robert Boyle, fu forse il primo a mettere in discussione la concezione aristotelica della materia, che dominava da quasi 2.000 anni. Nel suo libro *Il chimico scettico* contestò l'idea che la materia fosse fatta dei quattro elementi di fuoco, terra, aria e acqua: questi ultimi potevano anche essere buone descrizioni degli stati della materia, ma non certo i suoi costituenti.

Boyle propose quindi un nuovo elenco di elementi chimici, spingendosi fino a quella che all'epoca veniva quasi vista come un'affermazione eretica: dichiarò infatti che questi elementi erano dei minuscoli corpi – o atomi – che differivano gli uni dagli altri soltanto per «massa, forma, struttura e moto». Una posizione del genere era considerata pericolosa dal punto di vista teologico: agli occhi della Chiesa, che aveva sempre appoggiato la concezione aristotelica, rappresentava una visione materialistica e atea del mondo. Qualcuno ha pertanto visto in Boyle il Galileo della rivoluzione chimica.

Anche se Newton avrebbe concordato con Boyle nel ritenere il mondo materiale fatto di unità indivisibili, gli strumenti matematici da lui sviluppati in contemporanea al lavoro del chimico si basavano in modo sostanziale sull'idea che il tempo e lo spazio fossero divisibili all'infinito. Il calcolo infinitesimale, che consentiva agli scienziati di scattare un'istantanea di un universo in costante cambiamento, aveva senso solo come un processo in cui lo spazio viene diviso in

pezzi sempre più minuscoli per poi interpretare ciò che avviene in corrispondenza del limite dove i pezzi diventano infinitamente piccoli.

La questione dell'infinita divisibilità del tempo e dello spazio era stata un argomento di dispute filosofiche fin dall'antica Grecia, quando Zenone di Elea aveva formulato dei paradossi che sembravano sorgere da questa suddivisione dello spazio. Per esempio, Zenone aveva sostenuto che una freccia non potrebbe mai raggiungere il suo bersaglio, in quanto dovrebbe prima coprire la metà della distanza totale, quindi la metà della metà rimanente, quindi la metà successiva e così via; pertanto, per raggiungere il bersaglio dovrebbe compiere un numero infinito di passaggi. Il successo del calcolo infinitesimale di Newton riaccese il dibattito, ma c'era ancora chi considerava questa divisibilità all'infinito quasi alla stregua di un'eresia.

Il vescovo Berkeley scrisse un intero trattato, *L'analista*, per sostenere che il tentativo di dare un senso alla divisione per zero era assurdo, cosa resa chiara dal sottotitolo («Discorso indirizzato a un MATEMATICO infedele»).

Mentre la maggior parte dei matematici infedeli si convertirono ben presto alla forza del calcolo infinitesimale, altre scoperte di Newton andavano verso una concezione secondo cui, a differenza dello spazio e del tempo, la materia non poteva essere divisa all'infinito. La sua idea di un mondo fatto di materia indivisibile sarebbe col tempo diventata la teoria predominante dell'universo; all'epoca, però, era ancora perlopiù una semplice ipotesi con poche prove a suo sostegno.

La sua teoria sulle forze che agiscono su grandi oggetti, dai pianeti alle mele, aveva avuto un tale successo da convincere Newton che se quelle idee funzionavano su grande e media scala, lo stesso doveva valere su una scala piccolissima. Perché mai dovrebbe cambiare qualcosa nel modo in cui le leggi del moto determinano il comportamento dell'universo quando mettiamo il nostro dado sotto il microscopio? Il successo del calcolo infinitesimale nella sua applicazione al movimento dei pianeti dipendeva dal fatto che questi ultimi venivano considerati come singoli punti, con tutta la loro

massa concentrata nel loro centro di gravità. Forse, quindi, tutta la materia era costituita da particelle simili a piccoli pianeti il cui comportamento era dettato dalle sue leggi del moto. Nei suoi *Principia*, Newton si disse convinto che applicando le sue idee a queste singole particelle sarebbe stato possibile prevedere il comportamento di tutte le cose materiali.

Anche la teoria newtoniana della luce contribuì a rafforzare la sensazione che una prospettiva atomistica offrisse la chiave migliore per la comprensione del mondo. Considerare la luce come una particella sembrava il modo più semplice di descrivere quei fenomeni che aveva documentato nella sua *Ottica*. La riflessione della luce pareva corrispondere al comportamento di una palla da biliardo che rimbalza contro le sponde del tavolo. Tuttavia, da un punto di vista scientifico, non c'erano prove empiriche a sostegno di questo modello di un universo fatto di particelle indivisibili.

Anche usando i microscopi che iniziavano a diffondersi nel Seicento, non possiamo vedere nulla che giustifichi questo modello atomistico. E anche qualora si potessero osservare degli oggetti discreti, questo non dimostrerebbe comunque nulla riguardo alla loro indivisibilità. Tuttavia, la penetrazione della visione atomistica della materia nella cultura popolare dell'epoca ci mostra con chiarezza che il clima culturale stava cambiando. L'*Ode a Santa Cecilia* di Nicholas Brady, messa in musica da Purcell nel 1691, parla di semi della materia:

> *Anima del mondo! Da te ispirati,*
> *i dissonanti semi della materia si sono accordati,*
> *hai fatto sì che gli atomi dispersi si legassero,*
> *e in questo modo, attraverso le leggi della vera proporzione,*
> *le svariate parti sono venute a formare una perfetta armonia.*

La più solida prova a sostegno di una visione atomistica della materia emerse un secolo dopo dagli esperimenti che mostrarono come la materia poteva combinarsi per formare nuove sostanze. E queste combinazioni, come preannunciato da Brady, erano piene di una perfetta armonia.

L'algebra degli atomi

Fu il lavoro del chimico inglese John Dalton, all'inizio dell'Ottocento, a fornire la prima vera conferma sperimentale della visione atomistica della materia. La sua scoperta che i composti sembravano formati da sostanze che si combinavano tra loro secondo rapporti fissi esprimibili in numeri interi segnò la svolta e condusse la comunità scientifica ad accettare l'idea che queste sostanze fossero davvero costituite da unità discrete di materia.

Per esempio: «Gli elementi dell'ossigeno possono combinarsi con una determinata porzione di azoto gassoso oppure con il doppio di questa porzione, ma non con quantità intermedie». Ciò non costituiva certo una prova del fatto che la materia fosse discreta, e non bastava a smontare la fede di chi appoggiava ancora un modello continuo della materia, tuttavia costituiva una scoperta molto suggestiva: doveva esserci una spiegazione del modo in cui queste sostanze si combinavano tra di loro.

La notazione sviluppata per esprimere queste reazioni contribuì a sua volta a rafforzare la visione atomistica. La combinazione di azoto e ossigeno poteva essere espressa algebricamente come N + O oppure N + 2O, senza nessun'altra formula in mezzo. Sembrava che tutti i composti obbedissero a rapporti esprimibili in numeri interi. Per esempio, il solfuro d'alluminio veniva indicato in forma algebrica come $2Al + 3S = Al_2S_3$, dove gli elementi si uniscono in un rapporto di 2 a 3. Gli elementi non si combinavano mai in una proporzione non esprimibile in numeri interi. Era come se al cuore del mondo chimico ci fosse un'armonia musicale, la musica di minuscole sfere.

Lo scienziato russo Dmitrij Mendeleev è passato alla storia per aver organizzato questo crescente numero di ingredienti atomici in un modo tale da far iniziare a emergere uno schema basato sui numeri interi e sulla periodicità. Sembrava che la fede pitagorica nel potere dei numeri stesse tornando alla ribalta. Come diversi altri scienziati prima di lui, Mendeleev dispose gli elementi in ordine crescente di peso relativo, ma si rese conto di dover essere flessibile per cogliere gli schemi che intravedeva.

Aveva scritto i nomi degli elementi noti su una serie di cartoncini e continuava a ridisporli sulla sua scrivania in un gioco di pazienza chimica, cercando di portarli a rivelare i loro segreti. Ogni suo tentativo, però, andava a vuoto, tanto che gli sembrava di impazzire. Alla fine, quando crollò esausto per la stanchezza, il segreto emerse in un sogno che, una volta sveglio, gli suggerì lo schema secondo cui disporre i cartoncini. Una delle intuizioni più importanti che lo condussero al successo fu quando si rese conto di dover lasciare degli spazi vuoti: in altre parole, capì che dal mazzo mancavano ancora alcune carte.

La chiave della sua disposizione era il cosiddetto numero atomico, che dipendeva solo dal numero di protoni presenti all'interno del nucleo e non dalla somma di protoni e neutroni (che determinava invece il peso atomico dell'elemento). Dato che però all'epoca nessuno sapeva ancora nulla su questi ingredienti più piccoli, Mendeleev aveva semplicemente indovinato qualcosa sulla ragione alla base del suo ordinamento.

Era un po' come rendersi conto che un comune mazzo di carte può essere suddiviso in diversi semi, ma che tra le carte dei differenti semi ce ne sono alcune di uguale valore. Alla base degli elementi sembrava esserci una periodicità di otto, che faceva sì che gli elementi collocati a otto posizioni di distanza condividessero proprietà molto simili. A otto posizioni dal litio c'era il sodio, e altre otto posizioni dopo il potassio: erano tutti dei metalli teneri, scintillanti, molto reattivi. Schemi analoghi erano rintracciabili anche fra diversi gas con le loro relative proprietà.

Questa regola dell'otto era già stata notata prima della scoperta di Mendeleev ed era chiamata la legge delle ottave. Il paragone era con l'ottava musicale: se suono le otto note di una scala maggiore sul mio violoncello, la prima e l'ultima sono molto simili e vengono chiamate con lo stesso nome. Quando John Newlands presentò questa sua legge delle ottave atomiche alla Royal Society, venne accolto con scherno: «La prossima volta ci dirà che per comprendere gli elementi dobbiamo metterli in ordine alfabetico» fu il sarcastico commento di un membro. La disposizione trovata da

Mendeleev venne però a confermare, entro certi limiti, la veracità di questa legge delle ottave. Fu questa idea di una ripetizione o periodicità di schemi a far sì che l'ordinamento degli elementi proposto dal chimico russo prendesse il nome di «tavola periodica».

L'intuizione geniale di Mendeleev fu di comprendere che se in alcuni casi gli elementi non corrispondevano come previsto, ciò poteva indicare che ne mancava qualcuno. Gli spazi vuoti presenti nella sua tavola furono probabilmente il suo contributo più perspicace. Il fatto che ci fosse un buco in corrispondenza del trentunesimo posto, per esempio, spinse Mendeleev a predire, nel 1871, l'esistenza e le proprietà di una nuova sostanza che sarebbe stata in seguito chiamata gallio. Quattro anni dopo, il chimico francese Lecoq de Boisbaudran isolò i primi campioni di questo nuovo atomo, preannunciato dagli schemi matematici scoperti da Mendeleev.

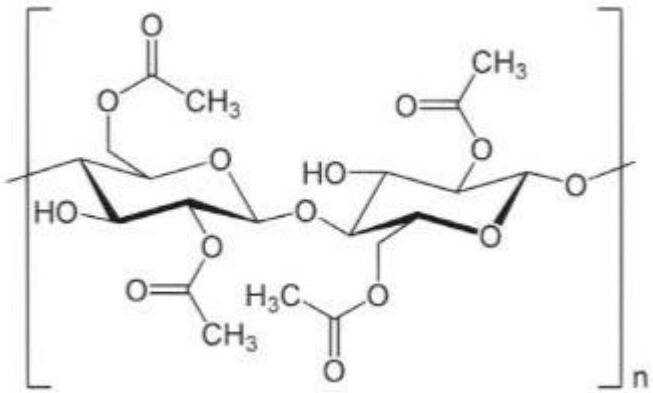
La ricetta per fabbricare un dado

Si era così arrivati a un elenco degli atomi che avrebbero dovuto costituire tutte le cose materiali. Per esempio, il mio dado è fatto di atomi di carbonio, ossigeno e idrogeno messi insieme in una determinata struttura chiamata acetato di cellulosa. Anche il mio corpo è costituito in massima parte di combinazioni di questi stessi atomi, ma con una struttura differente. L'acetato di cellulosa è una struttura omogenea priva di bolle, il che minimizza il rischio di una qualche alterazione degli esiti nei lanci del dado. In precedenza, i dadi erano fatti di un nitrato di cellulosa inventato da John Wesley Hyatt nel 1868; attraverso un cocktail di acido nitrico, acido solforico, fibre di cotone e canfora, creò una sostanza sorprendente in grado di resistere a forti tensioni e agli effetti di acqua, olii e persino acidi diluiti.

Questa sostanza, che il fratello di Hyatt battezzò celluloide, divenne un sostituto molto conveniente per la creazione di oggetti che, in precedenza, venivano ricavati intagliando il corno o l'avorio. Questa plastica sintetica trovò impiego nella

fabbricazione di palle da biliardo, colletti rimovibili, tasti da pianoforte e, per l'appunto, dadi. I dadi fatti di nitrato di cellulosa rappresentavano lo standard industriale all'inizio del Novecento, ma dopo diversi decenni d'uso si cristallizzavano e si decomponevano quasi in un istante, sbriciolandosi e rilasciando acido nitrico gassoso.

I dadi dei veri collezionisti sono in nitrato di cellulosa prodotti sul finire degli anni Quaranta e hanno evitato la cristallizzazione. Il mio dado, dal canto suo, non subirà questo destino. Ecco un'immagine della disposizione degli atomi all'interno del mio dado:



L'identificazione di questi elementi non costituiva una prova della correttezza del modello discreto della materia. Non c'era ragione di credere che questa rappresentazione degli ingredienti del mio dado non potesse essere una semplice formula che esprimeva il modo in cui veniva a combinarsi una struttura continua. Anche se i chimici propendevano per una visione atomistica dell'universo, nella comunità fisica si respirava un clima differente; e chi cercava di proporre modelli atomici della materia, come il tedesco Ludwig Boltzmann, veniva preso in giro.

Boltzmann riteneva che questa teoria atomica offrisse una chiave per interpretare il concetto di calore, basandosi sull'idea che un gas fosse costituito da minuscole molecole che si urtavano fra loro come miliardi di piccolissime palle da biliardo. Il calore, in questa prospettiva, non era nient'altro che l'energia cinetica combinata di queste minuscole palle in movimento. Grazie a questo modello e ai concetti della teoria della probabilità e della statistica, Boltzmann era in grado di spiegare il comportamento su larga scala di un gas; tuttavia, i

fisici perlopiù erano ancora legati a una visione continua della materia e si mostrarono sprezzanti nei confronti delle sue idee.

Boltzmann venne ridicolizzato a tal punto da essere costretto a ritrattare la sua posizione per cui questa teoria della materia rappresentava un'immagine autentica della realtà: al fine di pubblicare le sue idee, dovette dichiarare che si trattava soltanto di un modello euristico. Ernst Mach, il suo grande avversario nel dibattito sulla realtà degli atomi, gli chiese in tono beffardo se avesse mai visto un atomo.

Boltzmann soffriva di attacchi di depressione e c'è motivo di credere che fosse affetto da disturbo bipolare. Si ritiene che il rigetto delle sue idee da parte della comunità scientifica abbia contribuito alla depressione che lo colpì nel 1906, spingendolo infine a impiccarsi durante una vacanza con la famiglia vicino a Trieste, mentre sua moglie e sua figlia erano andate a nuotare.

Fu una fine tragica, non ultimo perché la prova più convincente della correttezza della sua teoria era in procinto di venire alla luce. Fu uno dei grandi nomi della fisica a produrre idee che sostenevano la visione atomistica e non potevano essere ignorate. Il lavoro svolto da Einstein e altri sul moto browniano sarebbe stato estremamente difficile da spiegare per chi, come Mach, credeva in una visione continua del mondo.

Il ping-pong del polline

Pur non consentendo di vedere i singoli atomi, i microscopi convenzionali permisero agli scienziati dell'Ottocento di vedere l'effetto che tali atomi avevano su ciò che li circondava. Tale effetto si dice moto browniano in onore di Robert Brown, che nel 1827 notò il comportamento casuale di piccole particelle di polline fluttuanti sulla superficie dell'acqua. Essendo il polline organico, in un primo momento Brown ritenne che questi suoi movimenti sull'acqua potessero essere la manifestazione di un qualche segno di vita. Tuttavia, un simile comportamento casuale era già stato osservato nel 1785 dallo scienziato olandese Jan Ingenhousz in alcuni

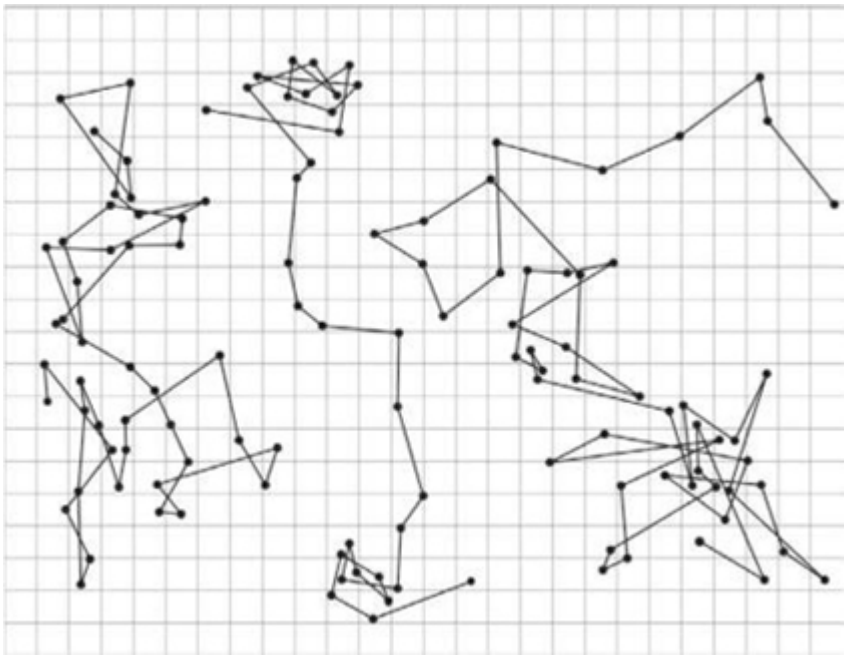
granelli di polvere di carbone che galleggiavano sull'alcol. Quando Brown notò che il medesimo comportamento si riscontrava anche nella materia inorganica, iniziò a chiedersi perplesso quale fosse la causa di questo moto caotico.

L'idea che potrebbero essere degli atomi invisibili a muoversi urtandosi all'interno degli oggetti materiali visibili era già stata sorprendentemente avanzata dal poeta romano Lucrezio nel suo poema didattico *Sulla natura delle cose*:

> Osserva che cosa avviene quando i raggi del sole penetrano in una casa portando la luce nelle zone in ombra. Vedrai una moltitudine di minuscole particelle mescolarsi in una molteplicità di modi […] questa agitazione rivela che ci sono dei movimenti di materia anche al di sotto, nascosti alla nostra vista. […] Questo movimento errante ha origine dagli atomi, che si muovono per primi da sé. Quindi, quei corpi che constano di una piccola aggregazione di atomi e che sono più vicini all'impeto di questi ultimi si mettono in moto, spinti dai loro invisibili colpi, e a loro volta stimolano i corpi un poco più grandi. Così il movimento emerge gradualmente dagli atomi fino a raggiungere il livello dei nostri sensi; in questo modo, vengono a muoversi anche quei corpi che possiamo vedere alla luce del sole, per quanto gli urti da cui nasce il loro moto ci rimangano invisibili.

Lucrezio scrisse le sue riflessioni nel 60 d.C., ma ci sarebbe voluta l'analisi matematica del moto sviluppata da Einstein per confermare questa spiegazione dei movimenti casuali riscontrati nei raggi di sole di Lucrezio e nel polline di Brown.

L'obiettivo è quello di presentare un modello in grado di produrre lo strano movimento esibito dalle piccole particelle di polline a pelo d'acqua. Se dividiamo la superficie in una griglia, sembra che il polline abbia pari probabilità di spostarsi a destra, a sinistra, in alto o in basso. La situazione è simile a quella del movimento di un ubriaco che fa dei passi a caso in base al lancio di un dado a quattro facce. L'immagine riportata qui sotto mostra i percorsi di diverse particelle di polline tracciati dal fisico francese Jean Baptiste Perrin, che raccolse la sfida di spiegare questo moto nel suo libro *Gli atomi*.



All’inizio del Novecento, venne avanzata l’ipotesi che i moti del polline che gli scienziati stavano osservando fossero il risultato delle spinte esercitate su quest’ultimo dalle molecole dell’acqua, molto più piccole.

Grazie alla sua brillantezza matematica, Einstein analizzò questo modello in cui un oggetto grande è sottoposto all’impatto di oggetti molto più piccoli che si muovono in modo casuale, dimostrando che un tale modello prediceva proprio il comportamento di fatto osservato. Pensate a una pista di pattinaggio su ghiaccio con un grosso disco fermo nel mezzo, e introducete quindi tutto un sistema di minuscoli dischetti che si muovono in direzioni casuali a particolari velocità. Di tanto in tanto, i dischetti colpiranno il disco grande, facendolo spostare in una determinata direzione. Il problema era stabilire quanti dischetti fossero necessari – e quale dovesse essere la loro grandezza relativa – al fine di produrre il comportamento del disco grande che veniva osservato.

Il successo di Einstein nell’elaborare un modello matematico in grado di replicare il moto del polline segnò un colpo devastante per tutti quanti ritenevano che un liquido come l’acqua fosse una sostanza continua: era molto difficile, per chi condivideva ancora la visione aristotelica della materia, trovare una spiegazione altrettanto convincente.

I calcoli permettevano di stimare quanto fossero piccole le molecole dell'acqua in relazione al polline da esse urtato. Tuttavia, pur costituendo una prova efficace della struttura discreta della materia, questa scoperta ancora non chiariva se fosse possibile suddividere all'infinito in parti via via più piccole.

In effetti, gli atomi indivisibili si dimostrarono tutt'altro che tali con la scoperta dei costituenti ancora più piccoli che formano gli atomi di carbonio o di ossigeno. Guardando più in profondità, si vide che un atomo è fatto a sua volta di dischetti ancora più minuscoli chiamati elettroni, protoni e neutroni, i primi dei quali erano già venuti alla luce circa otto anni prima che Einstein elaborasse la sua svolta teorica.

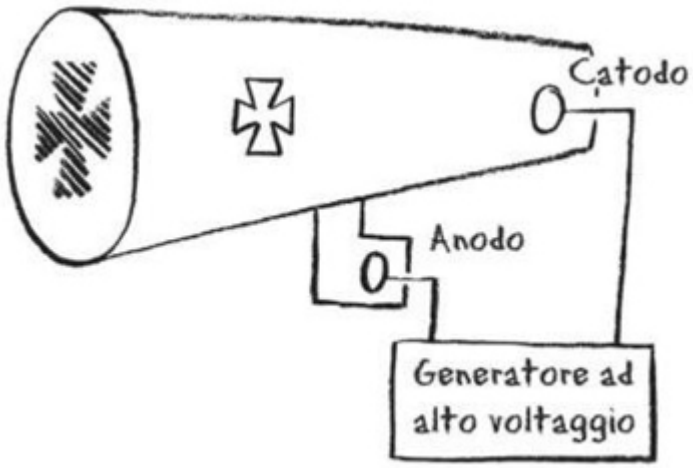
Scindere l'atomo

La scienza funziona così: possiamo mantenere il nostro modello di universo finché non salta fuori qualcosa che in tale modello risulta inspiegabile. L'idea che l'atomo potesse essere costituito da parti più piccole emerse da una serie di esperimenti che rivelarono l'esistenza di un'entità simile alle particelle, ma molto più minuta degli atomi della tavola periodica.

Questo minuscolo componente subatomico venne alla luce nel corso degli esperimenti condotti dal fisico britannico J.J. Thomson alla fine dell'Ottocento per studiare l'elettricità. Thomson stava cercando di capire come avvenisse la conduzione dell'elettricità attraverso un gas. Nei primi esperimenti, prese un tubo di vetro con due elettrodi alle estremità e, applicando un alto voltaggio, vide che si produceva una corrente elettrica; la cosa strana era che questa corrente sembrava di fatto osservabile, sotto forma di arco di luce che veniva a unire i due elettrodi.

Le cose si fecero ancora più bizzarre quando rimosse completamente il gas dal tubo e applicò il voltaggio attraverso il vuoto: l'arco di luce scomparve, ma il vetro all'estremità di un tubo diventò fluorescente. Quindi, inserendo una croce

metallica nel tubo, vide comparire in mezzo all'area luminescente un'ombra a forma di croce.



Gli elettroni emessi dal catodo che colpiscono la parete opposta fanno sì che il vetro diventi fluorescente.

L'ombra appariva sempre dalla parte opposta rispetto all'elettrodo negativo, altresì noto come catodo. La spiegazione migliore, pertanto, era che il catodo stesse emettendo qualche sorta di raggi che interagivano con la materia – che si trattasse del gas presente nel tubo oppure, nel caso del vuoto, del vetro del tubo stesso – e la facevano brillare.

Questi raggi catodici erano comunque un mistero. Si scoprì che erano in grado di attraversare sottili lamine d'oro poste sul loro percorso. Erano una sorta di fenomeno di tipo ondulatorio, come la luce? Altri ritenevano invece che fossero fatti di particelle a carica negativa emesse dal catodo e quindi attratte dell'elettrodo positivo (o anodo); ma com'era possibile che passassero attraverso solide lamine d'oro?

Thomson pensava che, nel caso fossero particelle a carica negativa, sarebbe stato possibile cambiare il loro percorso attraverso il tubo applicando un campo magnetico. Il fisico tedesco Heinrich Hertz aveva già tentato una prova del genere, ma il suo esperimento era fallito perché non aveva rimosso abbastanza gas e quest'ultimo aveva interferito. Una volta estratto il gas, le cose andarono secondo le speranze di Thomson: applicando un campo magnetico ai raggi, l'ombra si spostava. I raggi venivano piegati dal magnete.

La vera sorpresa, però, arrivò quando Thomson fece un calcolo matematico per scoprire quale fosse la massa di queste particelle cariche. Secondo le leggi del moto di Newton, applicando una forza a una massa possiamo provocare in quest'ultima uno spostamento la cui entità dipende dalla massa stessa; pertanto, dal valore della deviazione causata da un campo magnetico sarà possibile estrapolare le informazioni che cerchiamo riguardo alla massa della particella deviata.

Il calcolo dipende anche dalla carica della particella; una volta determinato questo valore in un esperimento separato, Thomson poté ricavare la massa. La risposta fu sbalorditiva: era circa duemila volte più piccola della massa di un atomo di idrogeno, il più piccolo della tavola periodica.

Il fatto che queste particelle sembravano aver origine dal metallo dell'elettrodo portò all'idea che fossero dei piccoli costituenti degli atomi; questi ultimi, pertanto, non erano indivisibili, ma avevano in sé delle parti più piccole. Queste particelle vennero chiamate elettroni, dal termine greco per indicare l'ambra (che era stata la prima sostanza a esibire una carica elettrica).

La scoperta che gli atomi erano formati da costituenti ancora più piccoli fu uno shock per la visione del mondo di molti scienziati. Thomson aveva esposto i suoi risultati in una conferenza:

> Molto tempo dopo, un illustre scienziato che aveva seguito il mio intervento mi confessò che, al momento, aveva pensato che li stessi prendendo in giro.

Il nuovo strato della materia

Anche quando Thomson usò un altro metallo, le masse delle particelle emesse dal catodo rimasero invariate; sembrava quindi che queste particelle fossero elementi costitutivi di ogni atomo. La prima ipotesi fu che un atomo di idrogeno, essendo duemila volte più pesante dell'elettrone, fosse formato da circa duemila di queste nuove particelle. Tuttavia, la massa di un atomo di elio misurava all'incirca due volte quella di un atomo di idrogeno: perché, quindi, il numero di elettroni saltava da

duemila a quattromila senza nulla in mezzo? Il fatto che tra le masse degli atomi della tavola periodica c'era un rapporto esprimibile in numeri interi era stato una delle ragioni per supporre che fossero davvero atomici; come si spiegavano, quindi, questi salti discreti nei valori di massa? Inoltre, gli atomi erano elettricamente neutri; dov'erano, allora, le altre particelle che cancellavano la carica degli elettroni? Sarebbe stato possibile far emettere agli atomi delle particelle positive che controbilanciassero quelle negative?

Dagli esperimenti emerse di fatto la prova dell'esistenza di un raggio di particelle positive che si muovevano nella direzione opposta. Quando veniva applicato un campo magnetico, queste particelle erano molto più difficili da deviare, il che significava che erano più massive degli elettroni. L'aspetto curioso era che le loro masse sembravano variare a seconda del gas che veniva usato per riempire i tubi. Nel caso dell'idrogeno, la massa era in pratica identica a quella dell'atomo di partenza; sembrava che gli atomi di idrogeno presenti nel tubo venissero spogliati dei loro elettroni, lasciando una grossa particella positiva che veniva quindi attratta verso l'elettrodo opposto.

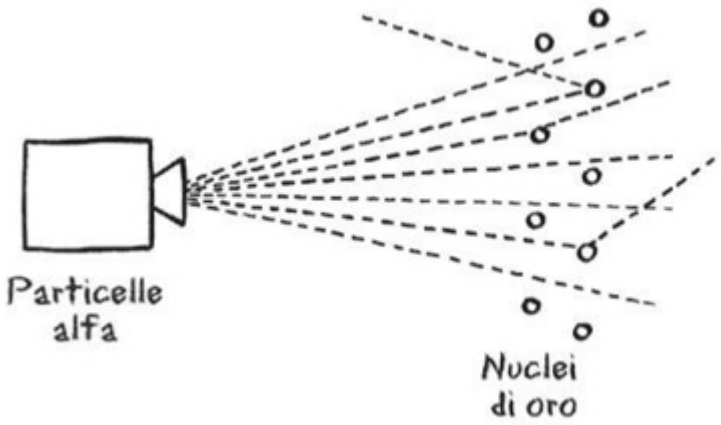
Thomson riuscì a ottenere un effetto analogo anche con altri gas: elio, azoto e ossigeno. Le masse erano sempre dei multipli interi di quella della particella positiva prodotta dall'atomo di idrogeno: l'armonia atomica non era venuta meno. Fin qui, non c'era motivo di credere che non ci fossero tanti tipi di particelle positive, proprio come c'erano tanti tipi di atomi. Thomson aveva proposto un modello di atomo noto come il pudding natalizio: la parte dell'atomo a carica positiva, più massiva dell'elettrone negativo, costituiva il grosso dell'atomo corrispondendo al corpo del pudding, mentre gli elettroni erano i piccoli chicchi di uva passa al suo interno.

Si aprì quindi l'epoca del bombardamento dell'atomo, che avrebbe infine portato al più grande distruttore di atomi mai costruito: il Large Hadron Collider del CERN. Al fisico britannico (di origini neozelandesi) Ernest Rutherford viene in genere attribuita la scoperta del protone, l'elemento costitutivo fondamentale di tutte quelle particelle a carica positiva che Thomson aveva esaminato.

Rutherford si appassionò al nuovo campo di studio della radioattività. Gli atomi di uranio emettevano particelle in grado di impressionare le lastre fotografiche. Gli esperimenti mostrarono due tipi di radiazioni, poi note come particelle alfa e particelle beta. Le prime erano le più facili da rilevare. Rutherford scoprì che tramite un campo magnetico poteva deviare questi raggi alfa nello stesso modo in cui Thomson aveva deviato le particelle negative, e i calcoli mostrarono che avevano la stessa massa degli atomi di elio privati dei loro elettroni. L'ipotesi che i raggi alfa emessi dall'uranio fossero delle parti di atomi di elio trovò conferma quando queste particelle vennero combinate con una doccia di elettroni, portando alla formazione di un gas stabile; le analisi chimiche stabilirono quindi che, di fatto, si trattava proprio di elio.

La balistica della carta velina

Quando un allievo di Rutherford, Hans Geiger, pose una sottile lamina d'oro tra un flusso di particelle alfa e la lastra che le registrava, l'evidenza empirica contraddisse di nuovo il modello teorico dell'atomo. Stando al modello atomico secondo cui la carica positiva è distribuita uniformemente (come un pudding), passando attraverso il metallo le particelle alfa (a carica positiva) dovrebbero essere respinte dalla carica positiva nell'atomo; ma dato che la carica è distribuita sull'intero atomo, la deviazione non dovrebbe essere troppo marcata.



Le particelle alfa vengono deviate dai nuclei degli atomi di oro.

Geiger scoprì invece che alcune delle particelle alfa subivano una fortissima deviazione, al punto che qualcuna, dopo aver colpito la lamina d'oro, rimbalzava indietro tornando nella direzione da cui era stata sparata. Rutherford era sconcertato: «Era come sparare un colpo di cannone da 15 pollici contro un foglio di carta velina e vederselo ritornare indietro».

Anche in questo caso, fu dai calcoli matematici che emerse un nuovo modello. Contando il numero delle particelle alfa deviate e misurando l'entità della deviazione, gli scienziati scoprirono che i dati corrispondevano a un modello in cui la carica e la massa erano concentrate in un minuscolo centro dell'atomo, che divenne noto come nucleo. Non era tuttavia ancora chiaro se questo nucleo fosse indivisibile oppure no.

Quando Rutherford bombardò con le particelle alfa alcuni atomi più leggeri, emerse la prova che il nucleo non era una singola entità ed era a sua volta composto da parti. Tracciando i percorsi delle particelle alfa in una camera a nebbia, ne vide alcuni che erano quattro volte più lunghi del previsto: era come se un'altra particella quattro volte più leggera venisse espulsa dal nucleo dall'impatto delle particelle alfa. Anche impiegando gas differenti, si arrivava a questo stesso risultato. Di fatto, Rutherford vide che l'impatto convertiva l'azoto puro in ossigeno: venivano aquistati i due protoni e i due neutroni della particella alfa, e l'elemento cambiava.

Era stata così trovata la prova dell'esistenza di un componente fondamentale da cui erano costituiti tutti i nuclei degli atomi. Questa particella si comportava esattamente come l'atomo di idrogeno privato del suo elettrone. Rutherford aveva così scoperto il protone. I nuclei dei diversi atomi erano formati prendendo differenti multipli di questo protone. L'unico problema era che, in questa prospettiva, la carica degli atomi non aveva senso: l'elio aveva un nucleo quattro volte più pesante dell'atomo di idrogeno, ma la carica era soltanto il doppio. Forse nei nuclei, attaccati ad alcuni protoni, c'erano degli elettroni che cancellavano la loro carica positiva. La fisica sviluppata per spiegare il comportamento di queste particelle portava però a escludere che elettroni e protoni potessero stare così vicini; questa risposta, pertanto, non reggeva.

Ciò condusse Rutherford a ipotizzare, negli anni Venti, la possibile esistenza di un terzo costituente, da lui chiamato neutrone, avente la stessa massa approssimativa del protone ma privo di carica. La ricerca di evidenze empiriche di questa particella si dimostrò assai difficile. Rutherford era solito discutere con il collega James Chadwick, cercando di immaginare i più bizzarri modi per scovare lo sfuggente neutrone. Nel corso di alcuni esperimenti condotti negli anni Trenta in Germania e in Francia, vennero infine individuate delle particelle emesse quando diversi nuclei venivano bombardati con particelle alfa; a differenza dei protoni, queste particelle non sembravano possedere alcuna carica. Gli scienziati, tuttavia, credevano erroneamente che si trattasse di una qualche sorta di radiazione elettromagnetica, come i raggi gamma (radiazioni ad alta frequenza) scoperti dal fisico francese Paul Villard agli inizi del secolo.

Chadwick, però, era convinto che queste particelle fossero proprio i neutroni di cui aveva parlato con Rutherford. Ulteriori esperimenti rivelarono che la loro massa era solo di pochissimo più grande di quella dei protoni; questa nuova particella priva di carica era l'elemento mancante che dava un senso ai valori di fatto riscontrati nel peso e nella carica degli atomi. Con la scoperta di Chadwick, sembrava che i costituenti fondamentali della materia fossero ormai noti.

Era un modello molto affascinante. I quattro elementi di Aristotele – fuoco, terra, aria e acqua – si erano ridotti a tre particelle: elettrone, protone e neutrone. Gli scienziati ritenevano che con questi tre componenti fondamentali fosse possibile costruire ogni oggetto materiale. Ossigeno: 8 protoni, 8 neutroni e 8 elettroni. Sodio: 11 protoni, 12 neutroni e 11 elettroni. Era come se la musica delle sfere stesse risuonando e le sue note fossero i costituenti fondamentali della materia: protoni, elettroni e neutroni. Tutta la materia sembrava formata da queste tre particelle, che si univano in combinazioni esprimibili attraverso numeri interi. Perché mai, quindi, qualcuno avrebbe dovuto ipotizzare che queste particelle fossero a loro volta fatte di entità più piccole? In tal caso, infatti, in mezzo agli elementi della tavola periodica ci si sarebbe potuti aspettare di vedere delle entità frazionarie.

Eppure la divisione della materia non si sarebbe fermata lì. Emersero forti ragioni matematiche e sperimentali per ritenere che protoni e neutroni non fossero indivisibili. I costituenti dei protoni e dei neutroni, però, hanno una strana proprietà: non amano essere visti isolatamente ma si presentano soltanto in gruppi, creando particelle come un protone o un neutrone. La sicurezza sta nei numeri. Ma allora, se questi componenti non sono mai stati visti da soli, perché gli scienziati reputano che ci siano delle parti ancora più piccole in cui possiamo dividere protoni e neutroni?

4

«Tutto quello che chiamiamo reale è fatto di cose che non possono essere considerate reali.»

NIELS BOHR

Alla fine degli anni Venti del Novecento sembrava che gli elementi costitutivi fondamentali della materia fossero ormai stati individuati: tutti gli atomi della tavola periodica erano fatti di diverse combinazioni di elettroni, protoni e neutroni. Tuttavia, se l'elettrone ha resistito a ogni tentativo di divisione, alcune scoperte avvenute nel corso dei decenni successivi avrebbero portato gli scienziati a credere che, nascosto sotto le altre due particelle, ci fosse un ulteriore strato di realtà.

Il motivo principale per ritenere che protoni e neutroni potessero non essere indivisibili non venne da qualche nuova tecnologia più sofisticata bensì dalla matematica della simmetria. È sorprendente come la matematica continui a dimostrarsi il miglior microscopio che abbiamo per guardare all'interno del nostro dado. Per spiegare il protone e il neutrone, infatti, iniziò a farsi strada un modello costruito su un concetto matematico che poteva essere suddiviso; ora, se la matematica poteva essere scomposta in parti più piccole, gli scienziati avevano la sensazione che lo stesso dovesse valere anche per il protone e il neutrone.

Il modello matematico in questione era emerso perché i fisici avevano scoperto che c'erano molte più particelle di quelle tre che erano guardate come i costituenti degli atomi stabili.

La scoperta di queste nuove particelle fu il frutto di esperimenti di collisioni: non di quelle che avvengono negli acceleratori costruiti dall'uomo, come il Large Hadron Collider, ma di quelle che si verificano in natura quando gli strati superiori dell'atmosfera vengono colpiti dai raggi cosmici.

Il serraglio delle particelle

La prima prova dell'esistenza delle nuove particelle venne trovata nelle camere a nebbia costruite dagli sperimentatori per tracciare le traiettorie delle particelle cariche. Una camera a nebbia consiste in una scatola a tenuta ermetica riempita di vapore sovrassaturo di acqua e alcool; la sovrassaturazione fa sì che ogni particella carica che attraversa il contenitore lasci dietro di sé una scia di condensazione.

Nel 1933, Carl Anderson – un fisico che lavorava al Caltech – aveva usato queste camere a nebbia per confermare l'esistenza di un nuovo, strano tipo di materia chiamato antimateria, che era stato ipotizzato qualche anno prima dal fisico britannico Paul Dirac. Con il suo tentativo di unificare la fisica quantistica e la teoria dell'elettromagnetismo, Dirac era riuscito a spiegare molto sugli elettroni; tuttavia, le sue equazioni sembravano avere una soluzione speculare completa che non corrispondeva a nulla che fosse mai stato osservato in laboratorio.

Le equazioni di Dirac erano un po' come l'equazione algebrica $x^2 = 4$. C'è la soluzione $x = 2$, ma c'è anche un'altra soluzione speculare, vale a dire $x = -2$ (dato che anche -2×-2 fa 4). Nelle equazioni di Dirac, questa seconda soluzione implicava l'esistenza di una versione speculare dell'elettrone dotata di una carica positiva. La maggior parte degli scienziati riteneva che questa fosse solo una curiosità matematica emersa dalle equazioni; quattro anni dopo, però, quando Anderson individuò nella sua camera a nebbia le tracce di una particella che si comportava proprio come un elettrone visto allo specchio, l'antimateria passò dalla teoria alla realtà. I positroni

– come vennero chiamati – di Anderson erano stati creati dalle interazioni fra particelle che avvengono nell'alta atmosfera. E non furono le uniche cose nuove a emergere.

Ben presto, nella camera a nebbia di Anderson iniziarono ad apparire tracce di particelle ancora più strane, la cui esistenza non era neppure stata prefigurata. Nel 1936, lo scienziato si mise ad analizzare questi dati con un suo studente di dottorato, Seth Neddermeyer. Le nuove particelle attraversavano la camera a nebbia come le particelle a carica negativa, ma non erano elettroni: le tracce da esse lasciate indicavano una massa molto più grande. Anche in questo caso, come aveva fatto Thomson, era possibile misurare la massa in base all'entità della deviazione subita dalla particella sotto l'influenza di un campo magnetico. La nuova particella, oggi chiamata muone, sembrava avere la stessa carica dell'elettrone, ma era molto più difficile da deviare.

Questa fu una delle prime nuove particelle scoperte nell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera. Il muone è instabile: decade rapidamente in altre particelle, scindendosi (nella maggior parte dei casi) in un elettrone e una coppia di neutrini. Questi ultimi, a loro volta, erano un'altra nuova particella la cui esistenza era stata predetta per spiegare il decadimento dei neutroni in protoni. I neutrini, minuscole particelle senza carica e quasi del tutto prive di massa, vennero di fatto individuati soltanto negli anni Cinquanta, ma la loro esistenza spiegava il decadimento sia del neutrone sia del nuovo muone. Il tasso di decadimento del muone è in media di 2,2 microsecondi, un lasso di tempo che permette a un discreto numero di queste particelle di raggiungere la superficie terrestre prima di decadere.

Il muone contribuì a confermare la predizione della teoria della relatività speciale di Einstein secondo cui il tempo rallenta quando ci si avvicina alla velocità della luce. Dato il periodo di dimezzamento del muone, infatti, il numero di queste particelle che fanno in tempo a raggiungere la superficie della Terra dovrebbe essere di molto inferiore a quello osservato. Questa discrepanza viene spiegata proprio dal rallentamento del tempo a velocità prossime a quelle della luce. Un orologio legato al muone riporterebbe che l'intervallo

di tempo impiegato per raggiungere la Terra è più breve: di conseguenza, un numero maggiore di muoni riesce di fatto a sopravvivere fino alla superficie, come attestato dagli esperimenti. Ritornerò su questo punto nel Quinto Confine, quando rifletteremo sul tempo spingendoci ai limiti della conoscenza.

Il comportamento del muone pareva molto simile a quello dell'elettrone, ma era più instabile e aveva una massa di gran lunga maggiore. Quando il fisico americano Isidor Rabi venne a sapere della scoperta, commentò con una battuta: «Ma chi è che l'ha ordinato?». Sembrava stranamente inutile che la natura avesse creato una versione più pesante e più instabile dell'elettrone. Rabi non sospettava neppure quante altre particelle esistessero.

Una volta compreso che le interazioni dei raggi cosmici con l'alta atmosfera creavano nuove forme di materia, i fisici capirono che era meglio non aspettare che le particelle raggiungessero le camere a nebbia nei laboratori: nell'intervallo di tempo richiesto, infatti, molte di esse potevano decadere in forme di materia tradizionali. Così, nella speranza di individuare altre particelle, gli scienziati iniziarono a trasferire le camere a nebbia in località d'alta quota.

Il team del Caltech scelse la cima di Mount Wilson, vicino alla loro sede di Pasadena. I tracciati rivelarono di fatto la presenza di nuove particelle. Altri gruppi di scienziati montarono le loro lastre fotografiche in osservatori sui Pirenei e sulle Ande nel tentativo di registrare ulteriori interazioni. Anche dei team di Bristol e Manchester rinvennero tracce di nuove particelle impresse nelle loro lastre fotografiche. Così il muone finì per diventare l'ultima delle preoccupazioni di Rabi: c'era un intero serraglio di nuove particelle che iniziavano a mostrarsi.

Alcune di esse avevano una massa pari a circa un ottavo di quella di un protone o di un neutrone; potevano avere carica positiva o negativa, e vennero battezzate pioni. In seguito venne scoperta anche una loro versione elettricamente neutra, più difficile da individuare. A Manchester, due fotografie realizzate nella camera a nebbia mostrarono quella che

sembrava essere una particella neutra che decadeva in pioni; la massa di questa nuova particella era più o meno la metà di quella di un protone. La camera a nebbia in cima a Mount Wilson registrò ulteriori prove a conferma di queste quattro nuove particelle che sarebbero diventate note col nome di kaoni.

Col passare del tempo vennero individuate sempre più particelle, tanto che il quadro complessivo finì per diventare caotico. Nel suo discorso di accettazione del premio Nobel, Willis Lamb scherzò dicendo: «Una volta, lo scopritore di una nuova particella elementare veniva insignito del premio Nobel; oggi una scoperta del genere andrebbe punita con una multa di 10.000 dollari». Si era sperato che la scoperta di elettroni, protoni e neutroni avrebbe semplificato il quadro della tavola periodica, ma ora era emerso che queste tre particelle erano soltanto la punta dell'iceberg: al di sotto di esse, infatti, c'erano più di cento nuove particelle che sembravano costituire i componenti fondamentali della materia. Come ammise all'epoca Enrico Fermi parlando con uno studente: «Giovanotto, se fossi in grado di ricordarmi il nome di tutte queste particelle, sarei un botanico».

Iniziò quindi la ricerca di un principio unificatore che spiegasse questi nuovi muoni, pioni, kaoni e così via, così come Mendeleev era riuscito a trovare un ordine che permetteva di classificare gli atomi della tavola periodica dandole un senso.

E, alla fine, la struttura fondamentale che sembrava spiegare questo serraglio di particelle – la mappa, per così dire, che ci consente di muoverci in questo zoo – emerse nella forma di una teoria matematica.

Mappare lo zoo delle particelle

Quando dobbiamo classificare qualcosa, è utile individuare quelle caratteristiche dominanti che ci permettono di raccogliere un gran numero di oggetti disparati in gruppi più piccoli. Nel caso della zoologia, per esempio, l'idea di specie

viene a portare un certo ordine all'interno del regno animale. Nella fisica, una caratteristica invariante che aiutò a suddividere lo zoo delle particelle in gruppi più piccoli fu l'idea di carica. In che modo la particella interagisce con la forza elettromagnetica? Gli elettroni vengono deviati in una direzione, i protoni nella direzione opposta e i neutroni non ne sono influenzati.

Così, man mano che queste nuove particelle venivano alla luce, potevano essere sottoposte al test della forza elettromagnetica: alcune finivano nella gabbia degli elettroni, altre prendevano la strada dei protoni e le rimanenti venivano messe insieme ai neutroni. Era un primo passo per imporre un certo ordine al serraglio delle particelle.

La forza elettromagnetica, però, è solo una delle quattro forze fondamentali che controllano l'universo: le altre sono la gravità, la forza nucleare forte (che tiene insieme protoni e neutroni all'interno del nucleo) e la forza nucleare debole (da cui dipendono alcuni fenomeni come il decadimento radioattivo).

La chiave stava nell'identificare altre caratteristiche simili all'idea di carica che permettessero di distinguere i diversi comportamenti di queste particelle in relazione alle altre forze fondamentali. Per esempio, la massa di una particella offriva un buon modo per stabilire una sorta di gerarchia nello zoo: consentiva di raggruppare pioni e kaoni come particelle più leggere dei protoni e dei neutroni che formano la materia ordinaria. Un nuovo insieme di particelle, chiamate barioni Sigma, Xi e Lambda, avevano invece masse più grandi del protone e del neutrone e spesso decadevano in questi ultimi.

In parecchi casi, le particelle con masse molto simili finirono per prendere lo stesso nome greco. Di fatto, il protone e il neutrone avevano masse talmente simili da far pensare che fossero strettamente legati, al punto che il fisico tedesco Werner Heisenberg (le cui idee saranno al centro del prossimo Confine) li ribattezzò nucleoni. La massa, però, era un criterio piuttosto grossolano e sbrigativo per classificare queste particelle. I fisici erano alla ricerca di qualcosa di più fondamentale, di uno schema che avesse la stessa forza

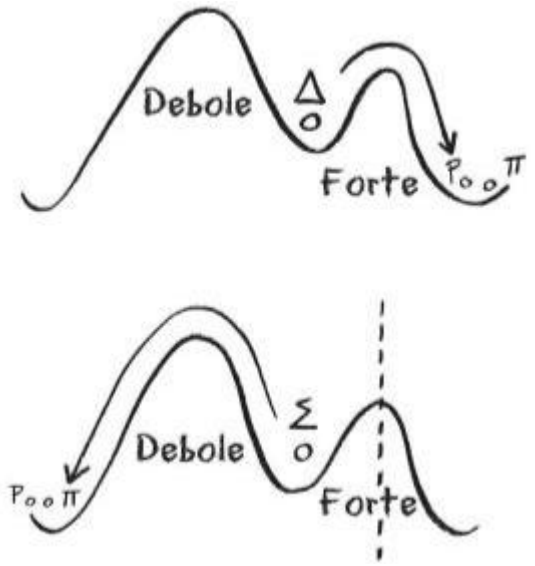
esplicativa di quello adottato da Mendeleev per ordinare gli atomi.

La chiave per trovare degli schemi che dessero un senso al serraglio di nuove particelle fu una nuova proprietà chiamata stranezza. Questo nome emerse per via del comportamento alquanto strano mostrato da alcune delle nuove particelle nel loro decadimento. Dato che la massa è equivalente all'energia (in base all'equazione einsteiniana $E = mc^2$) e che la natura favorisce gli stati a bassa energia, le particelle con una massa più grande cercano spesso di trovare dei modi di decadere in particelle con una massa più piccola.

Ci sono diversi meccanismi che possono entrare in gioco in questo decadimento, e ognuno dipende da una delle forze fondamentali. Ciascun meccanismo presenta una propria firma caratteristica che aiuta i fisici a capire quale forza fondamentale sta causando il decadimento. Anche qui, sono considerazioni relative all'energia a determinare quale forza ha le maggiori probabilità di essere all'opera nel decadimento di una particella. In genere, la forza nucleare forte è la prima ad avere una chance di far decadere una particella, cosa che di solito avviene entro 10^{-24} secondi. La seconda nella gerarchia è la forza elettromagnetica forte, che può portare all'emissione di fotoni. La forza nucleare debole è la più costosa in termini energetici e impiega quindi più tempo: il decadimento di una particella attraverso questa forza può così richiedere 10^{-11} secondi. Pertanto, misurando il tempo impiegato per il decadimento, gli scienziati possono avere un'indicazione di quale forza sia di fatto all'opera.

Per esempio, un barione Delta decade in 6×10^{-24} secondi in un protone e un pione attraverso la forza nucleare forte, mentre un barione Sigma impiega 8×10^{-11} secondi per decadere in questa stessa coppia di protone e pione. Il tempo di decadimento più lungo indica che questo secondo fenomeno è controllato dalla forza nucleare debole. In mezzo a questi estremi, abbiamo l'esempio di un pione (a carica neutra) che decade in due fotoni attraverso la forza elettromagnetica in un tempo di $8{,}4 \times 10^{-17}$ secondi.

Immaginate una palla collocata in una valle. Sulla destra c'è un possibile percorso che, con una piccola spinta, porterà la palla a superare la collina per poi scendere in una valle più bassa; questo percorso corrisponde alla forza nucleare forte. Sulla sinistra c'è un altro percorso che passa da una collina più alta per arrivare a sua volta a uno stato a energia più bassa; questa direzione rappresenta l'opera della forza nucleare debole.



Un barione Delta (Δ) decade attraverso la forza nucleare forte in un protone (P) e un pione (π). Un barione Sigma (Σ), dal canto opposto, decade nelle stesse particelle attraverso la forza nucleare debole.

Perché, quindi, il barione Delta segue la strada facile passando sulla collina più bassa mentre il barione Sigma prende la via più lunga? La cosa pareva alquanto strana. Sembrava che certe particelle incontrassero una barriera (rappresentata, nella figura, da una linea tratteggiata) che impediva loro di raggiungere la valle più bassa passando per la strada facile.

Non c'è straordinaria bellezza senza stranezza

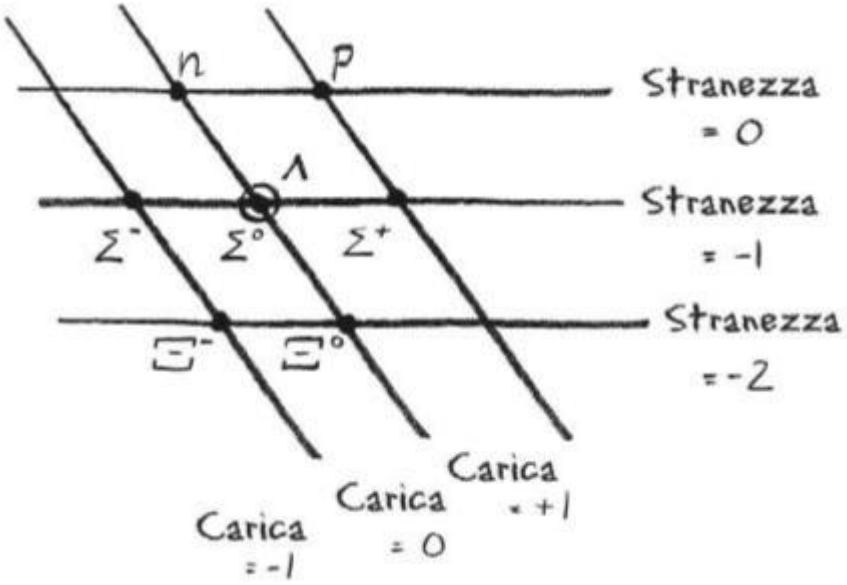
Per risolvere questo enigma, i fisici Abraham Pais, Murray Gell-Mann e Kazuhiko Nishijima idearono un'astuta strategia: introdussero una nuova proprietà analoga alla carica che mediava il modo in cui queste particelle interagivano o non

interagivano con la forza nucleare forte. La nuova proprietà, chiamata stranezza, offrì ai fisici un ulteriore criterio per classificare tutte queste particelle, a ciascuna delle quali venne attribuito un determinato valore di stranezza a seconda che decadesse seguendo la via lunga o meno.

L'idea è che la forza nucleare forte non può cambiare la stranezza di una particella. Pertanto, se avete due particelle con stranezza differente, la forza nucleare forte non può far decadere l'una nell'altra: c'è una barriera che blocca la strada per raggiungere la valle più bassa. La forza nucleare debole, dal canto opposto, può cambiare la stranezza. Così, dato che il decadimento di un barione Delta in un protone avviene attraverso la forza nucleare forte, possiamo dire che queste due particelle hanno lo stesso valore di stranezza, pari a 0; il barione Sigma, invece, ha un valore di stranezza diverso (−1), in quanto ha bisogno della forza nucleare debole per decadere in un protone. (Il fatto che a questa particella sia stato attribuito il numero −1 anziché 1 è una semplice eccentricità: in realtà, non sarebbe cambiato nulla se al barione Sigma fosse stato dato il valore 1 e ad altre particelle −1.)

Vennero quindi individuate altre particelle ancora più esotiche, create da collisioni ad alta energia, che sembravano decadere in due passi; furono chiamate particelle a cascata e si ipotizzò che fossero doppiamente strane, ragion per cui ricevettero il valore di stranezza −2. Il primo prodotto del decadimento aveva stranezza −1; quindi, il processo terminava con protoni e neutroni, che avevano stranezza 0. Questo modo di procedere potrà forse sembrare simile a quello dei prestigiatori che tirano fuori un coniglio dal cappello, ma fa parte del processo scientifico. Gli scienziati continuano a tirar fuori nuove cose dai loro cappelli, la maggior parte delle quali vengono poi gettate via perché non portano da nessuna parte; tuttavia, se tiriamo fuori un numero sufficiente di cose, di tanto in tanto ci capiterà di ritrovarci con un coniglio in mano. Come ammise Gell-Mann: «La teoria della stranezza mi venne in mente mentre stavo spiegando un'idea sbagliata a qualcuno; feci un lapsus, e mi ritrovai con la teoria della stranezza». La stranezza si rivelò un coniglio più che mai sorprendente.

In origine, l'idea di stranezza era stata introdotta come un semplice espediente convenzionale per tenere traccia dei diversi schemi di decadimento tra le particelle; non le era stato attribuito alcun significato fisico particolare, ma era soltanto un altro insieme di gabbie pensato per aiutare gli scienziati a classificare gli animali nello zoo delle particelle. Col tempo, però, questa proprietà dimostrò di essere il primo indizio di una realtà fisica molto più profonda che operava al di sotto di tutte le nuove particelle. Il momento clou arrivò quando i fisici presero delle particelle con un valore di massa simile e iniziarono a disporle su un diagramma che metteva in relazione la loro stranezza e la loro carica. Le immagini che si ritrovarono davanti erano piene di simmetria.

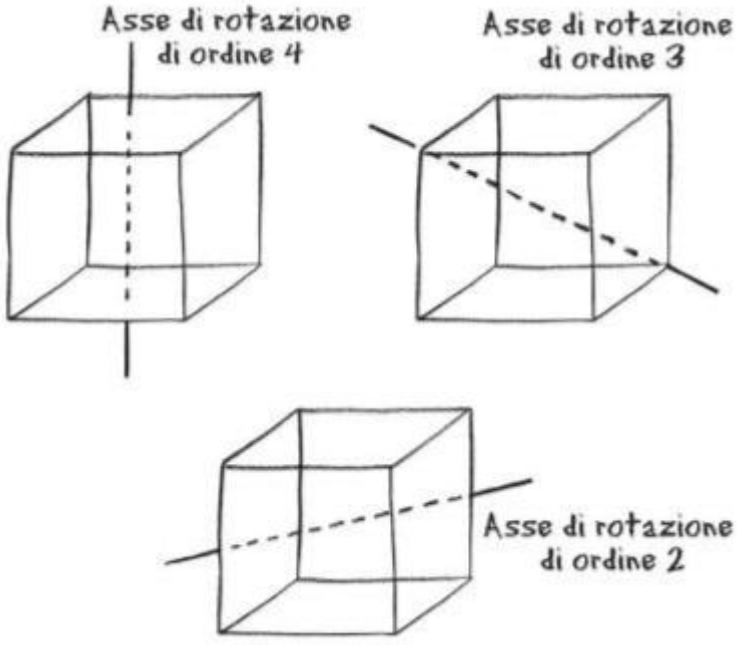


Lo schema emerso era quello di una griglia esagonale con due particelle situate al punto centrale. Prendendo i pioni e i kaoni e disponendoli su un diagramma che metteva in relazione la stranezza con la carica, si otteneva un'immagine simile. Quando ci ritroviamo davanti uno schema di questo tipo, capiamo di essere sulla pista giusta. La chiave per comprendere la realtà più profonda che operava al di sotto di queste particelle stava nel rendersi conto che gli schemi esagonali che emergevano in questi diagrammi non erano qualcosa di nuovo, ma erano già stati osservati prima. Non in fisica, ma nella matematica della simmetria.

Un'illuminazione simmetrica

Per chi ha studiato la matematica della simmetria, queste disposizioni di gabbie in una griglia esagonale con un doppio punto al centro sono qualcosa di familiare: rappresentano, infatti, la firma caratteristica di un oggetto simmetrico molto particolare chiamato SU(3).

La simmetria è qualcosa che conosco bene, e mi offre una splendida occasione di afferrare ciò che avviene nelle profondità del mio dado. Quest'ultimo, in effetti, è uno strumento perfetto per spiegare le idee al cuore della matematica della simmetria. Le simmetrie del mio cubo (non terremo conto dei puntini sulle facce del dado) sono tutti i modi in cui posso prendere il mio dado, farlo girare e rimetterlo sul tavolo così che appaia identico a prima dell'operazione: per esempio, posso limitarmi a ruotare il cubo di un quarto di giro attorno alla retta che passa per i centri di due facce opposte, o posso ruotarlo di un terzo attorno a uno degli assi che uniscono due vertici opposti.



Le mosse possibili sono in tutto 24 (inclusa quella, un po' strana, in cui lascio il cubo così com'è, senza fare nulla). Questo insieme di mosse simmetriche prende il nome di «S4», o «gruppo simmetrico di grado 4». Se includo anche la

simmetria speculare (ossia, se guardo il dado in uno specchio), le differenti simmetrie del mio cubo salgono a un totale di 48.

Il cubo andrebbe visto come la figura geometrica tridimensionale su cui opera il gruppo di simmetrie S4. Ci sono però altre figure geometriche con queste stesse simmetrie: per esempio, l'ottaedro è un'altra figura geometrica tridimensionale il cui gruppo di simmetrie coincide con quello del cubo. Ma non solo: anche alcuni oggetti con un numero di dimensioni superiore hanno a loro volta il gruppo di simmetrie S4. Pertanto, ci sono un sacco di differenti geometrie che hanno alla loro base il medesimo gruppo di simmetrie.

Dietro alle griglie esagonali con le particelle non c'erano le simmetrie del mio dado, bensì l'oggetto simmetrico SU(3), una sigla che sta per «gruppo unitario speciale nella dimensione 3»; questo gruppo può però descrivere le simmetrie di una gamma di oggetti geometrici diversi in differenti dimensioni. Le griglie esagonali create dalle particelle coincidono con l'immagine usata dai matematici per descrivere il modo in cui SU(3) opera su un oggetto nello spazio a otto dimensioni: le otto particelle della griglia esagonale corrispondono al numero di dimensioni necessarie per creare questo oggetto simmetrico.

Come la Stele di Rosetta, questa griglia esagonale portò alla luce un'intera nuova cultura all'opera nella fisica delle particelle, anche se fu un'altra analogia culturale a prendere piede per sottolineare l'importanza della scoperta: questo diagramma con otto particelle, corrispondente alla rappresentazione di uno spazio 8-dimensionale, ispirò infatti un richiamo all'«ottuplice sentiero», il concetto buddhista delle otto vie che conducono all'illuminazione spirituale.

C'erano anche altre immagini corrispondenti a oggetti in differenti dimensioni su cui SU(3) poteva operare, e la scoperta entusiasmante fu che questi differenti diagrammi potevano essere usati per raggruppare altri membri del serraglio delle particelle. Le differenti rappresentazioni geometriche delle simmetrie di SU(3) sembravano così responsabili delle diverse particelle fisiche da cui è costituita la materia dell'universo.

Trovo stupefacente vedere come più e più volte il mondo fisico sembri trasformarsi in una struttura matematica. Quello che dobbiamo chiederci è se e in che misura questa è soltanto un'utile interpretazione che ci aiuta a mettere insieme il quadro dell'universo fisico o se, invece, l'universo fisico è davvero una struttura matematica dotata di una sua fisicità. Con la scoperta di questo nuovo collegamento, le particelle fondamentali erano diventate strutture geometriche stabilizzate da questo gruppo di simmetrie che operavano sullo spazio geometrico.

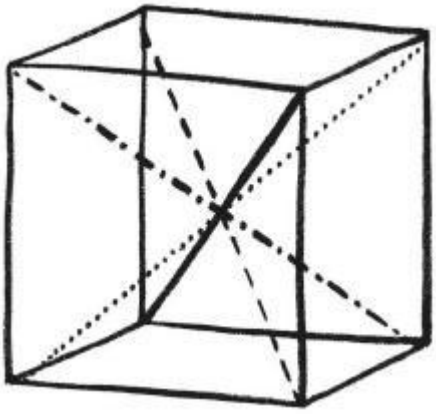
Heisenberg aveva ragione quando scrisse che «la fisica moderna ha infine deciso in favore di Platone. Di fatto, le più piccole unità di materia non sono oggetti fisici nel senso comune dell'espressione, ma sono forme, idee che possono essere espresse senza ambiguità soltanto nel linguaggio della matematica». L'icosaedro dell'acqua e il tetraedro del fuoco di cui parlava Platone sono stati sostituiti da questa nuova, strana forma simmetrica, SU(3).

Quando il mondo fisico si trasforma in una struttura matematica, ho subito l'impressione di trovarmi davanti a qualcosa che posso comprendere. La matematica della simmetria è il mio linguaggio. Per la maggior parte delle persone, la trasformazione delle particelle fondamentali in strutture matematiche implica un allontanamento dalle cose che conoscono. Paragonare le particelle alle palle da biliardo o alle onde dà loro una realtà più tangibile. Come possiamo conoscere qualcosa che non emerge dal modo in cui interagiamo fisicamente con il mondo che ci circonda? Persino il linguaggio astratto degli oggetti simmetrici a otto dimensioni è possibile soltanto perché, quando ne parliamo, stiamo astraendo le idee dalle cose che abbiamo incontrato sul piano fisico, come la simmetria del mio dado.

Le molte facce della simmetria

Il punto essenziale è che si possono avere molteplici oggetti geometrici differenti che abbiano alla base il medesimo gruppo

di simmetrie; e, di converso, se abbiamo un gruppo di simmetrie, possono esserci molti oggetti fisici differenti le cui simmetrie sono descritte da quel gruppo. In questo caso, i matematici dicono che quell'oggetto è una rappresentazione del gruppo astratto di simmetrie, nello stesso senso in cui tre mele o tre dadi sono manifestazioni fisiche del concetto astratto del numero 3. Per esempio, se prendo il mio dado, posso compiere 24 diverse rotazioni; ora, se considero le quattro linee diagonali che congiungono i vertici opposti del cubo, posso vedere che queste rotazioni vengono a permutarle.



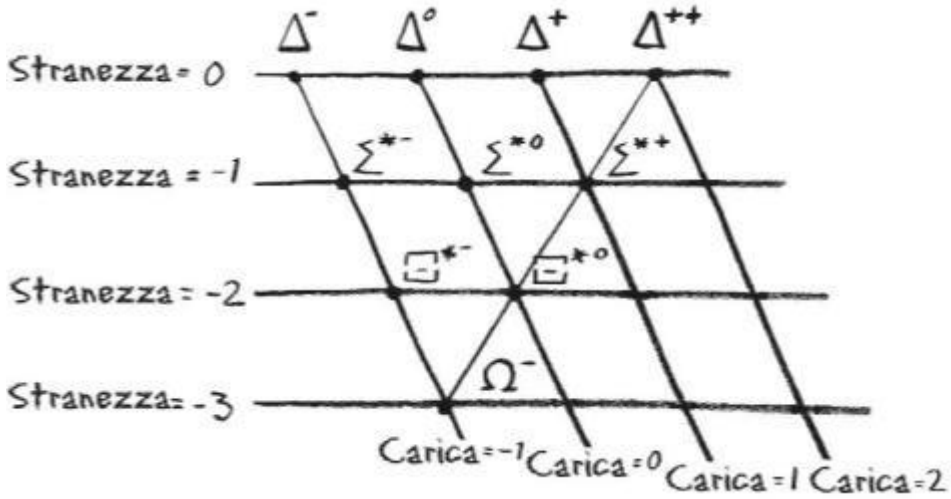
Di fatto, se metto quattro carte da gioco (Asso, Re, Donna, Fante) su quattro vertici (uno per ogni diagonale), con ogni rotazione è come se le mischiassi cambiando il loro ordine: quattro carte, infatti, possono essere disposte in 24 ordini diversi. Possiamo però prendere anche un'altra rappresentazione fisica di questo gruppo di simmetrie. Se consideriamo le rotazioni e le riflessioni di un tetraedro, troveremo di nuovo 24 differenti simmetrie; se incolliamo le carte da gioco sulle quattro facce di questa piramide a base triangolare, le simmetrie del tetraedro ci daranno i 24 differenti modi in cui le carte possono essere rimescolate. Abbiamo così trovato due diverse concretizzazioni tridimensionali di questo gruppo di simmetrie in un oggetto geometrico: una è quella delle rotazioni di un cubo, l'altra è quella delle rotazioni e delle riflessioni di un tetraedro. Ora, è emerso che, se consideriamo tutte le rappresentazioni geometriche fisiche di questo oggetto chiamato SU(3) in tutte le dimensioni, gli oggetti simmetrici ci danno un modo di generare tutte le differenti particelle fondamentali via via scoperte.

Furono i fisici Gell-Mann e Yuval Ne'eman ad accorgersi nel 1961 (ciascuno procedendo in modo indipendente dall'altro) degli schemi nascosti sotto queste particelle. Oltre a occuparsi di fisica, Ne'eman lavorava anche nell'IDF (le Forze di difesa israeliane) ed era stato mandato a Londra come il loro attaché militare. Avrebbe dovuto studiare la relatività generale al King's College, ma dopo aver visto che distava diversi chilometri dall'ambasciata israeliana a Kensington, decise di controllare che cosa stavano studiando all'Imperial College, che si trovava a soli cinque minuti di strada. Gli scienziati stavano facendo fisica delle particelle, e Ne'eman spostò così la sua attenzione dall'estremamente grande all'estremamente piccolo.

Anche se per le particelle Lambda, Sigma e Xi (nonché per il protone e il neutrone) lo schema corrispondeva alla simmetria a otto dimensioni di SU(3), nel caso dei kaoni e dei pioni mancava una particella al centro: pertanto, o l'ipotesi di questa corrispondenza era sbagliata, oppure c'era una nuova particella ancora da scoprire. Gell-Mann pubblicò la sua predizione della particella mancante in un'anticipazione di un suo scritto pubblicata dal Caltech all'inizio del 1961; qualche mese dopo, la particella Eta venne di fatto scoperta dai fisici di Berkeley.

Per una nuova teoria, questo è lo scenario perfetto: se sulla sua base viene fatta una predizione fisica poi confermata, gli scienziati sanno di essere sulla pista giusta. La stessa cosa si ripeté quando Gell-Mann e Ne'eman, nel giugno del 1962, parteciparono a una conferenza al CERN in cui venne annunciata tutta una schiera di nuove particelle: tre barioni Sigma-star con stranezza −1 e due barioni Xi-star con stranezza −2. L'ipotesi era che queste particelle corrispondessero a uno degli altri diagrammi che mostravano come il gruppo di simmetrie SU(3) operava su un oggetto simmetrico in dimensioni superiori.

Mentre Gell-Mann e Ne'eman cercavano di capire come inserire queste nuove particelle nel loro quadro, iniziò a emergere una differente rappresentazione che corrispondeva a un altro degli oggetti simmetrici su cui opera SU(3), un oggetto a dieci dimensioni. Tuttavia, in questa rappresentazione mancava uno degli angoli: c'erano solo nove particelle. Gell-Mann e Ne'eman compresero che c'era un posto vuoto e, di conseguenza, una possibile nuova particella. Fu Gell-Mann ad alzare per primo la mano e a ipotizzare la particella Omega con stranezza −3, una predizione che avrebbe trovato conferma nel gennaio del 1964.

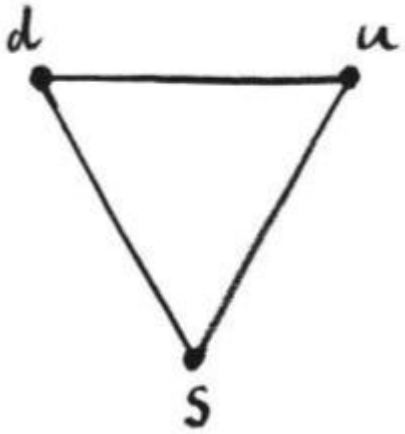


Era la versione novecentesca della storia della tavola periodica di Mendeleev: il riconoscimento della presenza di uno schema sottostante, ma con alcune tessere mancanti. E come la scoperta dei nuovi atomi corroborò il modello di Mendeleev, così anche l'individuazione delle particelle mancanti contribuì a convincere gli scienziati che questi schemi matematici erano delle chiavi di straordinaria importanza per orientarsi nello zoo delle particelle.

Gli schemi scoperti da Mendeleev nella tavola periodica dipendevano dal fatto che gli atomi erano costituiti da componenti più fondamentali: protoni, elettroni e neutroni. Ora, gli scienziati avevano la sensazione che anche questi nuovi schemi simmetrici rimandassero a qualcosa di simile: che, cioè, al cuore delle centinaia di particelle via via individuate ci fosse qualche elemento costitutivo più fondamentale.

Quark: l'ultimo strato mancante?

Diversi fisici avevano notato che, disponendo in strati gli schemi corrispondenti alle differenti rappresentazioni multidimensionali di SU(3), si otteneva una figura piramidale priva dello strato al vertice. In cima a tutto doveva esserci qualcosa di simile a un triangolo, corrispondente alla più semplice rappresentazione fisica di come SU(3) opera su una geometria tridimensionale. Guardando questi strati dalla prospettiva della simmetria, lo strato mancante era quello da cui si potevano sviluppare tutti gli altri. Tuttavia, nessuno aveva ancora individuato qualche particella corrispondente a questo strato.



Il triangolo rimanda a tre nuove particelle: il quark up (u), il quark down (d) e il quark strange (S).

Robert Serber, che era stato il braccio destro di Oppenheimer durante il progetto Manhattan, fu uno dei primi a ipotizzare che forse questo ulteriore strato rimandava a tre particelle fondamentali da usare per costruire tutte le particelle corrispondenti agli altri strati. Nel 1963, mentre pranzavano insieme, Serber illustrò a Gell-Mann la propria idea, ma quando il collega lo invitò a spiegare quale carica elettrica avrebbero dovuto avere queste ipotetiche particelle, lui non seppe rispondere. Gell-Mann si mise quindi a scribacchiare su un tovagliolo di carta e dopo poco trovò la soluzione che cercava: le loro cariche avrebbero dovuto essere pari a 2/3 o −1/3 di quella del protone. Questa risposta sembrava ridicola: «Sarebbe una buffa stravaganza» commentò Gell-Mann.

Nessun fisico aveva mai osservato qualcosa la cui carica non fosse un multiplo intero di quella dell'elettrone o del protone.

Era come ai tempi di Pitagora: tutto dovrebbe essere composto di multipli di numeri interi, ma poi salta fuori qualcosa che sembra dividere in parti questa unità di base. Le nuove cariche frazionarie erano ancora esprimibili come rapporti fra numeri interi, ma erano comunque qualcosa di mai osservato in precedenza. Dopo un primo momento di scetticismo, Gell-Mann si lasciò presto affascinare dalle ipotetiche particelle con carica frazionaria e, nelle settimane seguenti, iniziò a lavorare sulle implicazioni di queste idee, riferendosi a tali particelle con il nome *kworks*, un termine con cui indicava «piccole cose buffe» Serber lo riteneva un gioco di parole sull'idea di stravaganza (*quirkiness*) a cui Gell-Mann aveva accennato a pranzo.

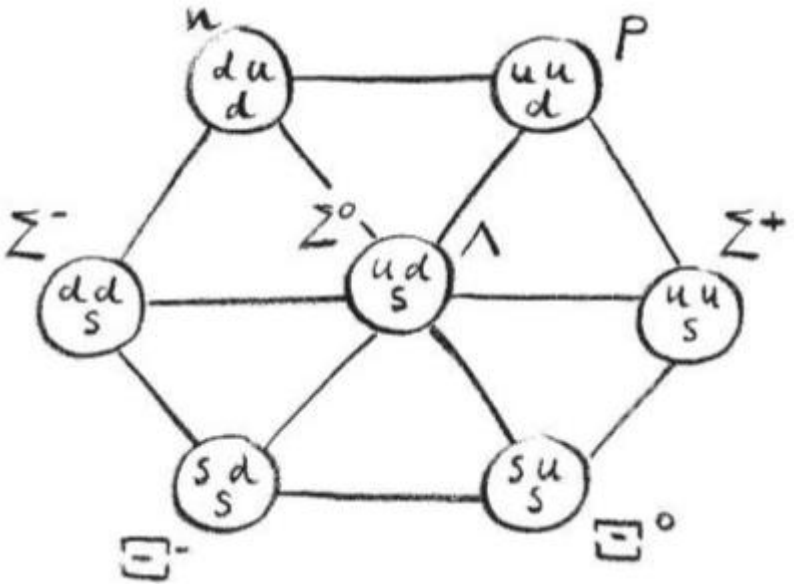
Mentre stava leggendo con attenzione il romanzo sperimentale di James Joyce *Finnegans Wake*, Gell-Mann si imbatté in un passo che gli suggerì come scrivere la parola di cui si serviva per descrivere queste ipotetiche particelle. Fu il primo verso di una poesia che ridicolizza re Mark, il marito cornuto del mito di Tristano, a catturare la sua attenzione: «*Three quarks for Muster Mark!*»

Dato che queste ipotetiche nuove particelle utili a costruire gli altri strati erano proprio tre, il riferimento sembrava perfetto; l'unico problema era che, nel testo di Joyce, la nuova parola *quark* fa chiaramente rima con «Mark» e non con *kwork*. Alla fine, comunque, la grafia e la pronuncia volute da Gell-Mann riuscirono a imporsi.

Oggi i quark vengono considerati come l'ultimo strato nella costruzione della materia, ma ci volle del tempo prima che questa idea prendesse piede. Mentre era al telefono con il suo ex supervisore di dottorato, Gell-Mann si mise a parlare dei quark ma venne subito interrotto dal suo interlocutore: «Suvvia, Murray, facciamo le persone serie… è una chiamata internazionale».

Agli occhi di Gell-Mann, gli schemi emersi sembravano troppo belli per non avere almeno una qualche verità di fondo. L'idea era che sotto questi strati di particelle ci fosse un nuovo

strato con tre particelle fondamentali: il quark up, il quark down e il quark strange, con carica – rispettivamente – di 2/3, −1/3 e −1/3. Le altre particelle erano quindi formate da combinazioni di questi quark (e delle loro antiparticelle, nel caso di kaoni e pioni). Il numero di quark strange presenti in una particella determinava il suo valore di stranezza; così, potremmo ridisegnare il diagramma dell'«ottuplice sentiero» mettendo al posto delle particelle – protone, neutrone, Sigma, Xi e Lamba – i quark da cui ciascuna di esse è composta.



L'«ottuplice sentiero» espresso nei termini dei quark da cui sono composte le diverse particelle.

Guardando la figura dal basso verso l'alto, il numero dei quark strange diminuisce di uno a ogni passo. Se mi sposto nella direzione dell'incremento della carica, vedo che a ogni passo aumenta il numero dei quark up (quelli con carica pari a 2/3). Infine, c'è una terza direzione che controlla l'incremento del numero dei quark down. Gli altri strati di particelle presentavano caratteristiche simili.

Gell-Mann non era l'unico scienziato a cullare l'idea di dividere la materia in queste particelle più piccole. Anche il fisico americano George Zweig credeva che questi schemi suggerissero l'esistenza di uno strato di particelle più fondamentali: lui le chiamava assi ed era probabilmente più convinto di Serber e Gell-Mann che fossero dotate di una realtà fisica. La bozza dello scritto in cui spiegava la propria posizione venne liquidata come «spazzatura» dal capo del

gruppo di teorici del CERN. Anche lo stesso Gell-Mann, pur avendo sviluppato idee simili, considerava queste particelle come un semplice modello matematico in grado di portare un certo ordine coerente nel quadro che stavano tracciando: in altre parole, erano soltanto un mezzo mnemonico, non una realtà concreta. Gell-Mann respinse senza mezzi termini la convinzione di Zweig che queste particelle avessero una loro esistenza fisica: «Il modello dei quark concreti – questa è una roba da teste di legno».

Dalla fantasia alla realtà

La situazione cambiò radicalmente verso la fine degli anni Sessanta grazie alle prove emerse dagli esperimenti condotti dai fisici dello Stanford Linear Accelerator Center, dove i protoni venivano bombardati con elettroni. Dall'analisi della carica di un protone risulta che le dimensioni di quest'ultimo si estendono su una regione di 10^{-15} metri. All'epoca si riteneva che il protone fosse distribuito uniformemente in questo minuscolo spazio, ma gli schemi di dispersione emersi dagli esperimenti lasciarono scioccati i ricercatori (così come, decenni prima, Rutherford era rimasto sorpreso vedendo i risultati del bombardamento degli atomi di oro con le particelle alfa): anche il protone, come l'atomo, era costituito per la maggior parte da spazio vuoto.

Gli schemi di dispersione erano in linea con un modello in cui il protone è formato da tre particelle più piccole. Come negli esperimenti di Rutherford, di tanto in tanto gli elettroni colpivano direttamente uno di questi tre punti e rimbalzavano indietro nella direzione da cui erano stati sparati. L'esperimento sembrava quindi confermare l'idea secondo cui il protone era composto da tre quark: anche se in natura questi ultimi non sono mai stati osservati singolarmente, la dispersione degli elettroni indicava con ragionevole certezza che il protone era formato da tre particelle più piccole.

Le teste di legno, quindi, avevano ragione: i quark up, down e strange non erano solo un artificio mnemonico di natura

puramente matematica, ma sembravano avere una loro realtà fisica. Si scoprì in seguito che questi tre quark non bastavano a coprire tutte le nuove particelle e se ne aggiunsero quindi altri tre: il quark charm, il quark top e il quark bottom. Oggi ci ritroviamo pertanto con un totale di sei quark, insieme alle loro rispettive antiparticelle.

La scoperta di questo modo di portare ordine nel serraglio delle particelle fisiche sfruttando la matematica della simmetria è una delle più eccitanti del Novecento. Vedere come queste particelle fondamentali obbedivano a schemi simmetrici già emersi nel campo della matematica dev'essere stato elettrizzante. Se mi chiedessero di scegliere una scoperta fisica che mi sarebbe piaciuto fare, questa è tra le prime in classifica. Dev'essere stata un'esperienza paragonabile a quella di un archeologo quando rinviene oggetti che fino a quel momento erano stati osservati soltanto in qualche parte remota del mondo: vedendo questi schemi così caratteristici, può concludere che dev'esserci stato un collegamento tra le due culture.

La cosa strana è che questa piramide di triangoli ed esagoni che dà origine alle differenti rappresentazioni di SU(3) prosegue all'infinito, il che significa che possiamo continuare a mettere insieme sempre più quark per costruire particelle via via più esotiche. Il modello fisico sembrava esaurirsi allo strato che unisce tre quark, ma nel 2015 il Large Hadron Collider ha annunciato l'eccitante scoperta delle prove dell'esistenza di una particella composta da cinque quark, chiamata pentaquark. Per poco i ricercatori del CERN non se l'erano lasciata sfuggire, pensando che si trattasse solo di un rumore di fondo; quando però avevano tentato di rimuovere questo disturbo, avevano trovato un forte segnale che puntava verso questo nuovo strato della torre della simmetria. Come ha ammesso uno di loro: «Non stavamo cercando un pentaquark. È stata la particella a trovare noi».

Fino a che punto possiamo spingerci a prevedere con la matematica le altre cose che potremmo osservare nel Large Hadron Collider? C'è un oggetto simmetrico ancora più grande, chiamato SU(6), che potrebbe unire tutti e sei i quark (up, down, strange, charm, top e bottom) in una fusione di

affascinanti particelle. In questo caso, al posto delle rappresentazioni bidimensionali di cui mi sono servito per riunire le particelle in famiglie, avremmo bisogno di rappresentazioni pentadimensionali. Anche se è possibile immaginare alcune di queste combinazioni più esotiche di quark, le differenze di massa tra i quark di base si fanno sempre più grandi, la splendida simmetria matematica si spezza e la realtà di tali particelle si fa via via meno plausibile. Di fatto, già il quark top è talmente instabile che decade prima di avere anche solo il tempo di legarsi a un altro quark. Perché i quark hanno masse così differenti? Questa è una domanda a cui i fisici non sanno ancora rispondere. La matematica sembra aprire le porte a un cocktail di particelle molto più ricco di quello che la realtà fisica è in grado di sostenere. In altre parole, la realtà sembra una pallida ombra di ciò che è matematicamente possibile. Tuttavia, la comprensione di questa realtà ci pone ancora numerose sfide.

Devo ammettere che, nonostante la mia lunga familiarità con gli strumenti concettuali della matematica, non sono ancora del tutto sicuro di sapere che cosa realmente siano questi quark. Ho trascorso mesi studiando diversi libri sulla fisica delle particelle (come *Quantum Mechanics and the Particles of Nature* di Sudbury) e leggendo le dispense dei corsi avanzati sulla simmetria e la fisica delle particelle tenuti a Oxford. E mentre sto seduto alla mia scrivania, circondato da queste storie sul funzionamento interno del mio dado, inizio a perdere un po' le speranze. Ci sono ancora un sacco di cose che non conosco: le integrali sui cammini che descrivono i futuri di queste particelle, il funzionamento interno delle equazioni di Klein-Gordon, il preciso significato di quei diagrammi di Feynman che i fisici sono soliti tracciare sulla lavagna. Guardo con invidia mio figlio, che ha iniziato a seguire un corso di laurea in Fisica: avrà modo di immergersi in questo mondo e di imparare a muoversi al suo interno con la stessa dimestichezza che io ho nel mio ambito di specializzazione.

Lo stesso discorso vale anche per il mio violoncello. Mi sono accostato a questo strumento da adulto e vorrei imparare a suonare le suite di Bach subito, non fra dieci anni; eppure,

come mi ci sono voluti anni prima di padroneggiare la tromba, così anche per il violoncello mi occorrerà un periodo di apprendimento lento, graduale e continuo, al termine del quale sarò in grado di suonare le suite. Questo mese sono riuscito a superare l'esame del terzo anno, ed è incredibile quanto fossi teso: il mio archetto tremava all'impazzata. Ero circondato da un gruppo di undicenni in procinto di fare l'esame del primo anno, comunque ho provato un piacevole senso di appagamento.

Come per il violoncello, so che se dedicassi abbastanza tempo al mondo della fisica delle particelle avrei qualche speranza di imparare quelle cose con cui i miei colleghi del dipartimento di Fisica, dall'altra parte della strada, sono in contatto ogni giorno. Mi rendo conto di non avere tempo per conoscere tutto, e ciò mi spaventa. Tuttavia, anche quegli stessi fisici che invidio per la loro familiarità con le teorie più all'avanguardia ammettono che, in ultima analisi, non potranno mai dire con certezza di sapere tutto quello che c'è da sapere.

Cowboy e quark

Ho intervistato uno degli scienziati a cui va il merito della scoperta di una delle ultime tessere del puzzle dei quark per vedere se i fisici delle particelle ritengono che possano essere fatte di pezzi ancora più piccoli. Melissa Franklin, oggi professoressa a Harvard, faceva parte del team che ha individuato il quark top al Fermilab, in America. Al contrario di quanto si pensa, la scoperta di una particella non è un evento istantaneo bensì un processo lento. Lei, comunque, preferisce che le cose vadano così: «Se fosse soltanto un "eureka", sarebbe una gran noia. Passi quindici anni a preparare la cosa e poi, in un minuto, è tutto finito? Sarebbe terribile». Il team trascorse probabilmente un anno a raccogliere i dati prima di sentirsi abbastanza sicuro per confermare, nel 1995, la scoperta di questa particella preannunciata dai matematici.

La Franklin si colloca senza dubbio nel lato sperimentale della fisica più che in quello teoretico: preferisce tenere in mano un trapano piuttosto che una matita, e ha contribuito a costruire da zero il detector del Fermilab.

Dovevamo tenere entrambi un intervento al Festival della scienza di Roma sul tema dell'inconoscibile e ha quindi accettato di incontrarmi nell'atrio del curioso albergo in cui alloggiavamo, che sembrava dedicato allo sport del polo. Dato che la Franklin è solita girare nel dipartimento indossando un paio di stivali da cowboy, ho pensato che forse si sentiva più a suo agio di me in questo hotel pieno di immagini di cavalli.

Alla fine, però, ha fatto un'entrata in scena a dir poco drammatica, ruzzolando giù per le scale che portano all'atrio. Dopo essersi data una spolverata, ha attraversato la sala a grandi passi e si è messa a sedere come se nulla fosse.

Avevo una gran voglia di sapere se ritenesse che i quark fossero l'ultimo strato della materia o se ci potesse essere qualche altra struttura nascosta sotto quelle particelle che lei stessa aveva contribuito a scoprire.

«Siamo scesi a 10^{-18} metri. I prossimi sette o otto ordini di grandezza saranno difficili da investigare, ma di certo su quella scala potrebbero accadere molte altre cose. È un po' strano pensare che potrei morire prima – soprattutto se continuo a cadere dalle scale – che potrei morire prima, dicevo, che la scienza proceda oltre.»

Le ho chiesto se riteneva ci fossero dei limiti fondamentali a quello che possiamo conoscere.

«Ci sono senza dubbio dei limiti ora, nell'arco della mia vita, ma non sono sicura che ci siano altri limiti in senso assoluto. Nella fisica sperimentale, dire che non ci sono modi per fare una determinata cosa è la via migliore per spingere qualcuno a escogitare un sistema per farla. Nella mia vita, non sarò mai in grado di misurare una cosa che decade in 10^{-22} secondi. Non penso che sia possibile. Ciò non ci autorizza però a concludere che questa cosa sia inconoscibile.

«Nessuno di noi avrebbe mai potuto immaginare il laser o l'orologio atomico, giusto? Bene, io penso che tutti i limiti

nella fisica saranno atomici, perché tutte le cose che facciamo coinvolgono gli atomi. So che sembrerà strano, ma abbiamo bisogno degli atomi nei nostri detector.»

È comunque interessante notare come Einstein abbia inferito l'esistenza degli atomi guardando il loro impatto sulle cose che possiamo vedere, come i grani di polline o la polvere di carbone. E oggi noi sappiamo dell'esistenza dei quark per via del modo in cui le particelle rimbalzano colpendo i protoni. Forse, quindi, troveremo un modo per scavare più in profondità.

«Sono sicura che nemmeno scienziati come Heisenberg e Bohr avrebbero potuto immaginare quello che oggi siamo in grado di rilevare. Suppongo che lo stesso valga anche per la nostra generazione… anche se noi siamo senz'altro molto più intelligenti» ha aggiunto ridendo.

Penso che questo sia il problema a cui ogni generazione si trova di fronte. Come possiamo sapere quali nuovi, ingegnosi metodi potrebbero essere sviluppati per scavare un po' più in profondità nel tessuto dell'universo? La Franklin, però, si chiede anche quante cose ci lasciamo sfuggire fra quelle già presenti nei dati che escono dai detector dell'attuale generazione.

«Nel mio campo, molti giovani non credono che sia possibile trovare qualcosa di nuovo che non sia stato predetto dai teorici. È una cosa triste. Se ti imbatti in qualcosa che non è stato predetto dalla teoria, probabilmente penserai che è sbagliato e lo liquiderai come una semplice fluttuazione. Ho paura che, per via del modo in cui sono congegnati i nostri esperimenti, abbiamo dei rilevatori che scattano solo sulle cose che stiamo cercando e non su altre. Mi chiedo che cosa ci stiamo perdendo.»

Immagino che il pentaquark annunciato poco tempo fa dal CERN abbia rischiato di fare proprio questa fine: per poco non è stato liquidato come un semplice rumore di fondo. Dato che stavo scrivendo un libro su quello che non possiamo conoscere, la Franklin mi ha chiesto come mi comporterei qualora mi fosse data la possibilità di premere un bottone e conoscere tutto. Mentre allungavo la mano per premere il suo

ipotetico bottone, vendendo la mia anima a Mefistofele per scoprire le dimostrazioni di tutti i teoremi su cui sto lavorando, lei mi ha fermato.

«Io non lo farei.»

«Perché no?»

«Perché così non è divertente. In certi casi lo farei anche: per esempio, se potessi premere un bottone e parlare perfettamente l'italiano. Ma non con la scienza. Penso che sia perché, se facessimo così, non potremmo capirla davvero: per comprendere come funziona, bisogna impegnarsi, lottare. Dobbiamo metterci a fare prove, misurare le cose e sforzarci di capirle.»

La cosa mi intrigava. Davvero, se avesse avuto l'opportunità di premere un bottone per sapere se ci sono altre particelle nascoste sotto i quark, non l'avrebbe usata?

«Se si limitassero a dirmi il metodo, sarebbe una gran cosa. Ma quello che ci piace di più nel fare scienza è proprio l'escogitare nuove idee. Lo sforzo è la parte più interessante. Tutta questa storia del bottone da premere è davvero complicata.»

Penso che, in ultima analisi, alla Franklin piaccia costruire cose, guidare carrelli elevatori e trapanare il cemento alla ricerca di nuove particelle, non starsene seduta dietro a una scrivania a pensare.

«Gli sperimentatori sono un po' come i cowboy: vanno a prendere al lazo una cosa laggiù e la portano qui. Non si preoccupano di quel ragazzo che se ne sta seduto in un angolo a riflettere sulla materia.»

«Quando arriverò a sessant'anni, sarò meno intransigente nei miei giudizi e avrò una mente più aperta. Smetterò di essere un cowboy… No, non voglio smettere di essere un cowboy… Non so… È difficile. I cowboy possono essere profondi. Quando vai al lavoro indossando un paio di stivali da cowboy, è un po' come un modo di dichiarare qualcosa.»

Detto questo, mentre il sole tramontava su Roma, è salita sul suo taxi e se n'è andata, per continuare la sua ricerca da

scienziata volta a scoprire quali altre cose potremmo prendere al lazo.

Il violoncello o la tromba

I quark sono l'ultima frontiera della fisica delle particelle oppure, un giorno, potremmo riuscire a dividerli in parti ancora più piccole, così come l'atomo è stato scomposto in elettroni, protoni e neutroni e questi ultimi due, a loro volta, in quark?

Molti fisici ritengono che le attuali prove sperimentali, combinate con la teoria matematica che sta alla base di tali esperimenti, ci abbiano dato la risposta alla domanda su quali siano le vere unità indivisibili da cui è formato il mio dado. Come la tavola periodica di 118 elementi chimici potrebbe essere ridotta a differenti modi di mettere insieme i tre componenti fondamentali di elettroni, protoni e neutroni, le centinaia di nuove particelle trovate nelle collisioni dei raggi cosmici potrebbero essere ridotte a un semplice insieme di ingredienti. Il serraglio delle particelle è stato addomesticato. Ma come facciamo a essere sicuri che i cancelli non si possano riaprire un'altra volta, liberando nuove bestie sconosciute? La verità è che i fisici non sanno se questo sia l'ultimo capitolo della storia.

Guardando il modello simmetrico che sta sotto a queste particelle, il triangolo corrispondente ai quark è l'ultimo strato indivisibile che descrive la differente rappresentazione fisica di questo oggetto SU(3). La matematica della simmetria indica che abbiamo toccato il fondo, che il triangolo corrispondente ai quark è lo strato indivisibile su cui sono costruiti tutti gli altri. La matematica della simmetria sta quindi cercando di dirmi che ho raggiunto l'indivisibile. Forse, tuttavia, stiamo finendo nella stessa trappola in cui cadde Gell-Mann quando, all'inizio, dubitò dei quark perché avrebbero dovuto avere una carica frazionaria. C'è però un'altra proprietà dei quark e degli elettroni a supporto, in una certa misura, della convinzione che potrebbero essere indivisibili: sembra, cioè, che non occupino

nessuno spazio, ma si comportano come se fossero concentrati in un singolo punto.

In matematica, la geometria è fatta di solidi tridimensionali, piani bidimensionali, linee unidimensionali e punti a zero dimensioni. La cosa strana è che questi dovrebbero essere oggetti astratti, privi di una realtà fisica nel nostro universo tridimensionale. In fin dei conti, che cos'è una linea? Se tracciamo una linea su un foglio e la guardiamo al microscopio, vedremo che di fatto ha una larghezza e che, quindi, non è propriamente una linea. Anzi, ha anche un'altezza, in quanto gli atomi allineati si impilano gli uni sugli altri creando un piccolo crinale di grafite (o di qualunque altro materiale venga oggi usato per le matite) che attraversa la pagina.

In modo analogo, un punto nello spazio potrebbe essere identificato attraverso le sue coordinate GPS, ma non possiamo aspettarci che un oggetto fisico sia localizzato solo ed esclusivamente in quel punto. Non potremmo mai vederlo. Le sue dimensioni sarebbero pari a zero. Tuttavia, un elettrone, sotto molti aspetti, si comporta proprio come se fosse concentrato in un singolo punto dello spazio, e lo stesso anche dicasi dei quark all'interno del protone e del neutrone. Lo schema secondo cui gli elettroni si disperdono allontanandosi gli uni dagli altri e rimbalzando dai quark all'interno di protoni e neutroni ha senso solo in un modello in cui tutte queste particelle sono prive di volume: dando loro un volume, otterremmo uno schema di dispersione diverso. Ora, se queste particelle sono davvero puntiformi, se sono dei punti materiali, non possiamo aspettarci che siano divisibili.

E come spiegarsi il fatto che gli elettroni hanno una massa? Qual è la densità di un elettrone? La densità si ottiene dividendo la massa per il volume, ma se il volume è zero avremo una densità infinita. Infinita? Quindi ogni elettrone viene di fatto a creare un minuscolo buco nero? Siamo entrati in pieno nel territorio della meccanica quantistica, perché dire dove è situata una particella non è affatto semplice come potrebbe sembrare, come vedremo nel prossimo Confine.

Le note discrete della mia tromba hanno quindi vinto sul glissando continuo del mio violoncello? Sarà molto difficile sapere se questa storia è davvero arrivata alla fine. Gli atomi erano ritenuti indivisibili perché si combinavano sempre secondo rapporti di numeri interi; poi, però, sono stati divisi in quelle minuscole parti che stanno al centro dell'odierna visione dell'universo. Perché non dovremmo aspettarci che la storia si ripeta, portandoci nuove sorprese man mano che scaviamo più in profondità? Perché dovrebbe esserci un inizio, un primo strato da cui è fatto tutto il resto? È il classico problema del regresso all'infinito, in cui ci imbatteremo più e più volte. Come rispose l'anziana signora a uno scienziato che cercava di prendersi gioco della sua teoria secondo cui l'universo era poggiato sulla schiena di una tartaruga: «Lei è molto intelligente, giovanotto, ma sotto ogni tartaruga c'è un'altra tartaruga!».

Anche se gli elettroni e i quark sono particelle concentrate in un singolo punto dello spazio, non ci sono ragioni di ritenere che un punto non possa essere fatto da due punti. O, magari, ci sono dimensioni nascoste con le quali non abbiamo ancora interagito. Questo, in effetti, è ciò che ci suggerisce la teoria delle stringhe, nella quale questi punti materiali si presentano come corde (stringhe) unidimensionali che vibrano a determinate frequenze di risonanza, dove la diversità delle frequenze dà origine a differenti particelle. Mi sembra così di essere ritornato al modello pitagorico dell'universo: forse è il mio violoncello ad avere la meglio sulla tromba, e le particelle fondamentali non sono nient'altro che corde vibranti.

Se sono alla ricerca di cose che non potremo mai sapere, la composizione ultima del mio dado potrebbe appartenere a pieno titolo al loro novero. La storia di ciò che conosciamo sul mio dado è piena di ammonimenti. Arriveremo mai al punto in cui non ci sarà più nessun nuovo strato di realtà da scoprire? E come faremo a sapere se l'ultima teoria formulata sarà quella definitiva?

Ci potrebbe essere un ulteriore problema. L'attuale teoria dell'estremamente piccolo – la fisica quantistica – indica dei limiti alla conoscenza insiti nella teoria stessa. Come vedremo nel prossimo Confine, se continuo a dividere il mio dado in

parti sempre più piccole, a un certo punto sono destinato a incontrare una barriera oltre la quale non posso procedere.

Terzo Confine: il barattolo dell'uranio

5

«Per il progresso nella scienza, è assolutamente necessario che l'incertezza sia una parte fondamentale della vostra natura interiore.»

RICHARD FEYNMAN

C'è da stupirsi a vedere quante cose si possono comprare su Internet. Oggi, per esempio, mi è arrivato per posta un piccolo barattolo di uranio-238 radioattivo: «Utile per compiere esperimenti nucleari» recitava la pubblicità. Mi sono divertito a leggere i commenti delle altre persone che l'avevano acquistato: «Finalmente non devo più comprarlo dai libici nel parcheggio di qualche supermercato». Un altro acquirente aveva però una lamentela da fare: «Ho comprato questo prodotto 4,47 miliardi di anni fa e oggi, quando l'ho aperto, era mezzo vuoto».

L'uranio è un elemento che si ritrova in natura e la documentazione mi garantisce che non c'è nessun pericolo a tenerlo qui sulla scrivania mentre scrivo: devo solo stare attento a non polverizzarlo e a non ingerirlo. Sul pacchetto c'è scritto che l'uranio emette radiazioni a un tasso di 766 impulsi al minuto. Per la precisione, questo materiale produce un'ampia varietà di radiazioni: particelle alfa, particelle beta e raggi gamma. Quello che le specifiche non possono garantire, però, è quando, di preciso, emetterà la sua prossima particella.

Di fatto, la fisica quantistica afferma che questa è una cosa che non possiamo mai sapere: fino a oggi non è stato messo a punto nessun meccanismo che ci consenta di predire con esattezza quando l'uranio emetterà una radiazione. La fisica post newtoniana che abbiamo esplorato nel Primo Confine lasciava intendere che, in teoria, tutto ciò che avviene

nell'universo obbedisce a un insieme deterministico di equazioni matematiche. All'inizio del Novecento, però, un gruppo di giovani fisici – Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Einstein e altri – innescò una rivoluzione, facendo emergere una nuova prospettiva su ciò che possiamo davvero conoscere riguardo all'universo. Il determinismo veniva così messo fuori gioco: a quanto pare, è la casualità a dettar legge.

Per comprendere questo aspetto dell'ignoto, devo padroneggiare una delle teorie più difficili e controintuitive mai entrate negli annali della scienza: la fisica quantistica. Per avere un'idea della sfida che mi attende, mi basta leggere le dichiarazioni degli scienziati che, pur avendo vissuto immersi in questo mondo, si sono lamentati della sua macchinosità. Dopo le sue rivoluzionarie scoperte nel campo della fisica quantistica, Werner Heisenberg raccontò: «Continuavo a ripetermi la domanda: Com'è possibile che la natura sia così assurda come ci è apparso in questi esperimenti atomici?». Einstein dichiarò che «se tutto questo è corretto, significa la fine della scienza». Schrödinger era talmente scioccato dalle implicazioni della sua stessa teoria da ammettere: «Non mi piace, e sono rammaricato di averci avuto a che fare». Eppure, la meccanica quantistica è una delle teorie più solide e meglio testate che si possano ritrovare nei libri di scienza. È uno dei più grandi successi scientifici del secolo scorso, e nulla è finora riuscito anche solo a scalfirne la reputazione. Pertanto, non ci resta che gettarci a capofitto in questo mondo segnato dall'incertezza, seguendo il buon consiglio di Feynman:

> Sto per raccontarvi come si comporta la natura. Se vi limiterete ad accettare che magari si comporta proprio così, rimarrete affascinati e incantati da ciò che apprenderete. Se potete evitarlo, però, non continuate a ripetervi «Ma com'è possibile che le cose stiano così?», perché altrimenti finirete per sprofondare in un vicolo cieco da cui nessuno è mai riuscito a uscire. Non c'è nessuno che sappia com'è possibile che le cose stiano così.

Radiazioni casuali

I miei tentativi di comprendere che cosa sta per accadere al mio barattolo d'uranio illustrano perfettamente il senso della rivoluzione innescata da questi scienziati.

Su un lungo periodo di tempo, il tasso di decadimento radioattivo si approssima a una costante e, in media, è assai prevedibile, così come il lancio del mio dado. Tuttavia, stando alla fisica del Novecento, c'è una differenza fondamentale tra il dado e il barattolo d'uranio: nel caso del dado, infatti, ho perlomeno l'impressione che, se disponessi di una quantità sufficiente di dati, sarei in grado di stabilire l'esito del lancio; in quello dell'uranio, invece, sembra che non ci sia modo di determinare quando il materiale emetterà una particella alfa. La completezza delle informazioni, qui, non fa nessuna differenza: secondo l'attuale modello della fisica quantistica, l'esito è davvero del tutto casuale. Ci troviamo di fronte a un controesempio della tesi di Laplace secondo la quale l'universo era come un immenso orologio.

Le rivelazioni della fisica quantistica sono un trauma per chi è alla ricerca di una conoscenza certa. Non posso fare nulla per sapere quando il barattolo sulla mia scrivania emetterà la sua prossima particella alfa? È scioccante. Non c'è davvero modo di saperlo? Si dibattte molto fra chi sostiene che questo fenomeno sia realmente casuale – qualcosa, cioè, che non potremo mai conoscere – e chi ritiene che potrebbe esserci un qualche meccanismo nascosto, non ancora scoperto, che spiegherebbe il momento in cui la radiazione viene emessa.

Questo aspetto dell'ignoto è legato a uno strato di ignoranza ancora più profondo che avvolge l'universo dell'estremamente piccolo. Per poter applicare le equazioni del moto scoperte da Newton al calcolo della futura evoluzione dell'universo, occorre conoscere la posizione e la quantità di moto di ogni sua singola particella. Da un punto di vista pratico ciò risulta ovviamente impossibile, ma le scoperte fatte nel Novecento hanno portato in luce un ulteriore problema: anche se considero soltanto un unico elettrone, è in via di principio impossibile conoscere con esattezza tanto la sua posizione quanto la sua quantità di moto. Il nostro attuale modello dell'estremamente piccolo ha un limite intrinseco relativo alle cose che possiamo conoscere: è il cosiddetto principio di indeterminazione di Heisenberg.

Se nel Primo Confine abbiamo visto che la casualità che dovrebbe governare il lancio del dado è soltanto l'espressione

di una mancanza di conoscenza, nel mondo dell'estremamente piccolo il caso sembra invece essere al centro di tutto: un dado inconoscibile decide che cosa succederà al pezzetto di uranio contenuto nel barattolo sulla mia scrivania.

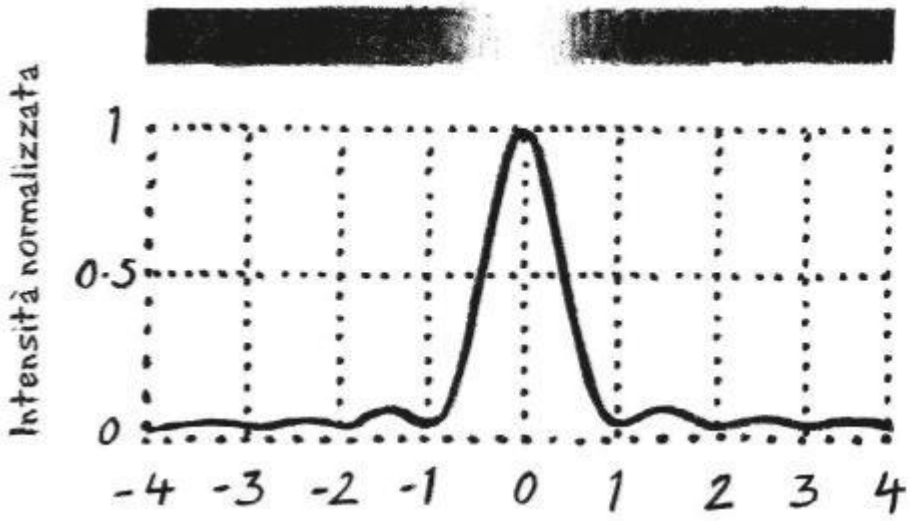
Ho imparato ad accettare l'inconoscibilità dell'esito del lancio del dado perché, in fondo al mio cuore, so che si tratta di un evento che danza comunque al ritmo regolare delle equazioni di Newton. Non sono però sicuro che riuscirò mai a farmi una ragione dell'inconoscibilità del mio barattolo d'uranio, il quale, stando alla teoria, danza al ritmo di una musica non suonata da nessuno. La sfida è: questa cosa rimarrà per sempre inconoscibile o dobbiamo aspettarci un'altra rivoluzione teoretica che porterà con sé una prospettiva radicalmente nuova, così com'è avvenuto all'inizio del Novecento?

Onda o particella?

I primi accenni della rivoluzione novecentesca si ebbero quando gli scienziati cercarono di comprendere la natura della luce: è un'onda oppure una particella? La grande opera di Newton sull'ottica, pubblicata nel 1704, la rappresentava come una particella. Se consideriamo un raggio luminoso come un flusso di particelle, il comportamento descritto da Newton appare del tutto naturale. Prendiamo, per esempio, il modo in cui la luce si riflette: per predire la traiettoria seguita da un raggio dopo che ha colpito una superficie riflettente, posso rappresentarmelo come una palla da biliardo lanciata contro un muro. La geometria della luce era costituita da queste linee rette e, secondo Newton, ciò poteva essere spiegato soltanto supponendo che la luce fosse fatta di particelle.

I suoi rivali, al contrario, ritenevano che un modello ondulatorio fosse in grado di descrivere molto meglio la natura della luce: quest'ultima aveva infatti troppe caratteristiche difficili da spiegare in termini di particelle. Quindi, agli inizi dell'Ottocento, un esperimento ideato dal fisico inglese

Thomas Young parve segnare la fine del modello della luce come una particella (o modello corpuscolare).

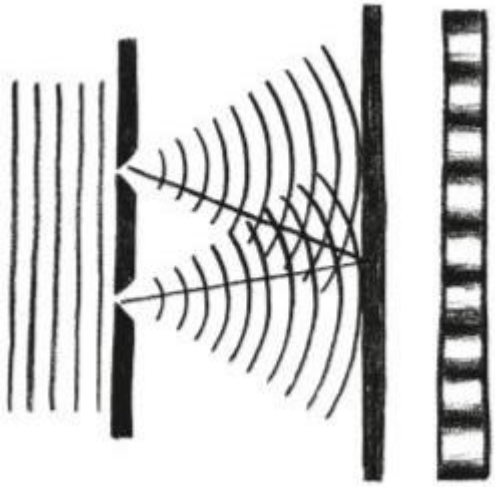


L'intensità della luce registrata sulla lastra fotografica dopo il suo passaggio attraverso una singola sottile feritoia.

Se proiettiamo un fascio di luce su uno schermo, con una sottile feritoia verticale, dietro al quale abbiamo posto una lastra fotografica, lo schema che osserveremo su quest'ultima (una volta impressionata dai raggi passati attraverso la feritoia) sarà quello di una regione chiara, allineata con la feritoia e la sorgente luminosa, che sfuma gradualmente nell'oscurità man mano che ci allontaniamo dalla linea centrale. Fin qui, tutto sembra in linea con una visione corpuscolare della luce, nella quale, durante il passaggio delle particelle attraverso la feritoia, possono verificarsi piccole deflessioni per cui parte della luce va a finire a destra o a sinistra di questa regione chiara. (Anche con una singola feritoia, se è piccola in rapporto alla lunghezza d'onda della luce, allontanandoci dalla regione centrale chiara assisteremo a qualche variazione di tipo ondulatorio nell'intensità luminosa, il che suggerisce che alla base del fenomeno ci sono delle onde.)

Il problema per la teoria corpuscolare della luce emerse quando Young introdusse nello schermo una seconda feritoia verticale parallela alla prima. Ci si sarebbe aspettati di trovare due regioni chiare registrate sulla lastra fotografica, corrispondenti alle particelle che passavano dall'una o dall'altra apertura; Young, invece, osservò che sull'intera superficie della lastra c'era una continua alternanza di fasce

chiare e scure. Curiosamente, alcune regioni della lastra sono illuminate se rimane aperta soltanto una feritoia, mentre sprofondano nell'oscurità quando viene aperta anche l'altra. Se la luce fosse una particella – come una palla da biliardo – come si spiegherebbe il fatto che, dandole varie possibilità di passare, all'improvviso non sarebbe più in grado di raggiungere determinate regioni della lastra? L'esperimento rappresentava una pesante sfida per il modello newtoniano della luce come particella.



La luce emessa da sinistra passa attraverso le due feritoie nello schermo e colpisce la lastra fotografica sulla destra. Le fasce chiare e scure a destra della lastra rappresentano la figura di interferenza registrata.

Questo alternarsi di fasce luminose e oscure sembrava spiegabile soltanto attraverso un modello ondulatorio. Immaginate di trovarvi davanti alle placide acque di un lago: se gettate due sassi nell'acqua allo stesso tempo, l'interazione fra le onde da essi provocate sarà tale che alcune loro parti si combineranno per formare un'onda molto più grande, mentre altre si annulleranno a vicenda. Se mettiamo in acqua una tavola di legno, vedremo che, a causa di questa interazione fra le onde, verrà colpita per tutta la sua lunghezza da una serie alternata di picchi e ventri.

La luce che emerge dalle due feritoie sembra produrre due onde che interagiscono in un modo simile a quello dei sassi gettati in acqua: in alcune regioni, le onde luminose si combinano creando fasce chiare, mentre in altre si cancellano a vicenda producendo fasce scure. Nessun modello

corpuscolare della luce sarebbe in grado di spiegare queste figure d'interferenza.

I sostenitori della teoria corpuscolare furono infine costretti a gettare la spugna nei primi anni Sessanta dell'Ottocento, quando si scoprì che la velocità di diffusione della luce corrispondeva esattamente a quella predetta da James Clerk Maxwell con la sua nuova teoria della radiazione elettromagnetica, basata sulle onde. I suoi calcoli mostrarono che la luce era di fatto una forma di radiazione elettromagnetica, descritta da equazioni le cui soluzioni erano onde di diversa frequenza corrispondenti a differenti tipi di radiazione elettromagnetica.

Il futuro riservava però una sorpresa. Proprio come l'esperimento di Young sembrò spingere gli scienziati verso un modello ondulatorio della luce, alla fine dell'Ottocento vennero condotti due nuovi esperimenti i cui risultati potevano essere spiegati solo supponendo che la luce viaggiasse in pacchetti discreti: in altre parole, solo se era quantizzata.

Una cacofonia di onde

I primi indizi del fatto che la luce non poteva essere assimilata a un'onda emersero dai tentativi di comprendere la radiazione elettromagnetica che veniva prodotta nelle fornaci a carbone che alimentavano la rivoluzione industriale. Il calore è movimento; ora, se scuotiamo un elettrone, quest'ultimo, avendo una carica negativa, verrà a emettere una radiazione elettromagnetica. È proprio questo il motivo per cui i corpi caldi risplendono nella loro incandescenza: gli elettroni, muovendosi su e giù, emettono una radiazione. L'elettrone può essere paragonato a una persona che tiene in mano un capo di una corda per saltare: quando la sua mano inizia a muoversi su e giù, la corda si mette a oscillare come un'onda. Ogni onda ha una propria frequenza che registra quante volte va su e giù in un secondo. È questa frequenza a determinare, per esempio, quale sarà il colore visibile della luce: la luce rossa ha una frequenza bassa, mentre quella blu ne ha una alta. La

frequenza contribuisce inoltre a determinare la quantità di energia contenuta nell'onda: più alta è la frequenza, maggiore sarà l'energia dell'onda. L'altro fattore da cui dipende l'energia di un'onda è la sua ampiezza, che misura quanto è grande la forma d'onda. Per restare all'esempio della corda per saltare, più energia metteremo nel movimento della mano, più alte saranno le vibrazioni della corda. Gli scienziati hanno usato per secoli la frequenza dominante della radiazione come misura della temperatura: calor rosso, calor bianco. Quanto più un fuoco è caldo, tanto più alta sarà la frequenza della luce emessa.

Ho avuto occasione di vedere all'opera una di queste fornaci a carbone quando mi sono recato alla stazione di pompaggio di Papplewick, nei pressi di Nottingham. Una volta al mese, gli addetti accendono i forni per uno dei loro «giorni del vapore». La fornace è situata in uno splendido edificio vittoriano: a quanto pare, i costi di costruzione della stazione furono molto più bassi di quelli preventivati e avanzarono quindi dei fondi anche per decorare il fabbricato, che oggi assomiglia a una chiesa dedicata non a Dio, bensì alla scienza dell'era industriale.

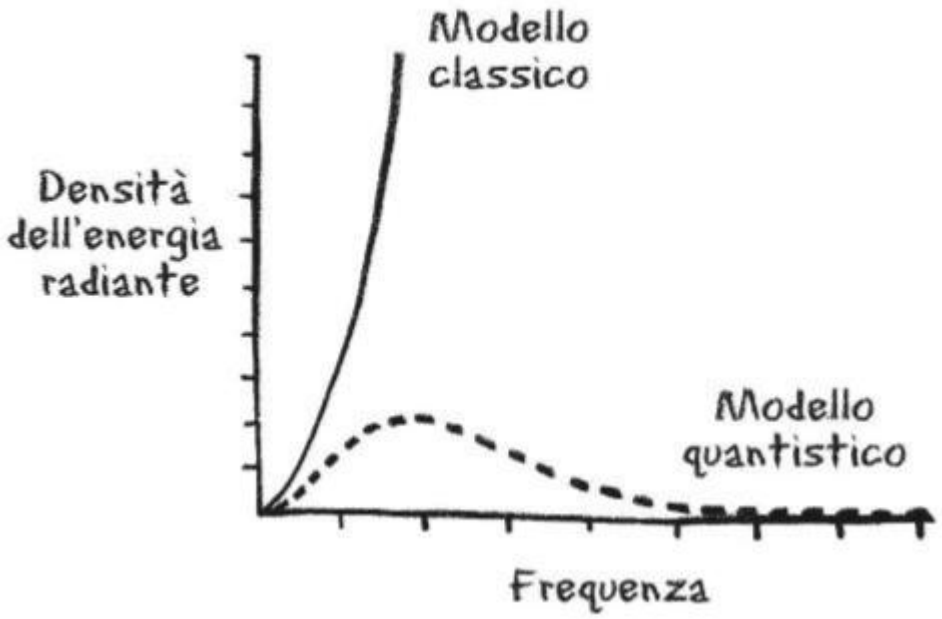
La temperatura all'interno della fornace di Papplewick raggiungeva qualcosa come i 1000 gradi Celsius. Alla fine dell'Ottocento, gli scienziati erano interessati a osservare quale fosse lo spettro di frequenze luminose all'interno della fornace per ogni determinato valore di temperatura. Una fornace chiusa può raggiungere un equilibrio termodinamico in cui il calore che scuote gli atomi provoca l'emissione di una radiazione poi riassorbita, così che nemmeno una parte della radiazione elettromagnetica va perduta.

Quali saranno le frequenze della radiazione all'interno della fornace al raggiungimento del punto di equilibrio? Possiamo paragonare questa situazione a quella delle corde del mio violoncello che attendono di essere fatte vibrare. L'energia totale di una corda che vibra è una funzione della frequenza e dell'ampiezza della sua vibrazione: le onde con una frequenza più alta necessitano di più energia per essere messe in movimento, ma ciò può essere compensato creando un'onda dall'ampiezza minore. In linea teorica, usando una quantità

d’energia fissa è possibile far vibrare onde di qualunque frequenza, ma con l’aumentare di quest’ultima l’ampiezza si farà via via più piccola.

Un’analisi teorica dello spettro sembrava indicare che nella fornace si sarebbero dovute produrre onde di frequenza arbitraria: tuttavia, contrariamente a quanto predetto dalla teoria – basata su un modello ondulatorio – dell’elettromagnetismo, quando ho dato un’occhiata dentro la fornace di Papplewick non sono stato fulminato da un fascio di raggi X ad alta frequenza. E non solo: se sommassi tutti i contributi delle frequenze all’interno della fornace in corrispondenza dello stato di equilibrio termico, l’analisi basata sul modello ondulatorio della luce porterebbe all’assurda conclusione che l’energia totale contenuta nel forno è infinita. Se così fosse, però, la fornace di Papplewick non sarebbe durata a lungo.

Sembra che a ogni determinata temperatura ci sia una qualche frequenza massima oltre la quale le onde non possono più vibrare. La rappresentazione classica è la seguente. Se la luce fosse come la corda vibrante di un violoncello, il forno dovrebbe generare onde di tutte le frequenze, con il numero di onde che crescerebbe con la frequenza. Alle basse frequenze, il grafico risulta corretto, ma col salire delle frequenze vedo che l’intensità della radiazione alle frequenze più alte cala finché, superato un certo punto (che dipende dalla temperatura) non viene più osservata alcuna onda che abbia una frequenza superiore a questo valore.



Le frequenze all'interno di un forno chiuso predette dal modello classico e da quello quantistico.

Nel 1900, il fisico tedesco Max Planck prese le osservazioni sperimentali sulla distribuzione delle frequenze emesse da una fornace come quella di Papplewick ed elaborò una brillante idea in grado di spiegare come ottenere la curva di distribuzione effettiva anziché la curva assurda predetta dal modello classico, in cui la luce è interpretata come la corda vibrante di un violoncello.

Planck suppose che ogni frequenza della radiazione elettromagnetica avesse un'energia minima richiesta per il suo mettersi in moto. In altre parole, non possiamo continuare a ridurre l'energia di un'onda che vibra a una determinata frequenza aspettandoci che continui a suonare: a un certo punto, quando l'energia scende sotto un dato limite, l'onda non seguita a vibrare ad ampiezze sempre più piccole ma, semplicemente, si appiattisce. Di fatto, il modello di Planck asseriva che non c'era nessun comportamento continuo: ogni volta che l'energia aumentava, lo faceva in salti quantizzati. Questi salti nel livello energetico erano estremamente piccoli, perciò difficilmente osservabili, a meno che uno non li stesse proprio cercando. Tuttavia, una volta posta questa assunzione, le implicazioni matematiche relative all'intensità della radiazione elettromagnetica a ciascuna frequenza corrispondevano con precisione alla radiazione di fatto prodotta dal forno.

Forse, quindi, l'universo non era poi continuo e uniforme come gli scienziati avevano creduto fino alla fine dell'Ottocento. Neppure gli atomisti – coloro che ritenevano che la materia fosse formata da elementi fondamentali indivisibili – avevano mai immaginato che la loro filosofia si potesse applicare a cose come l'energia. L'implicazione per quanto riguarda il mio violoncello è che se tiro l'archetto e faccio salire il volume, l'aumento di quest'ultimo avverrà per gradini discreti, benché al vostro orecchio sembri di percepire un incremento graduale e continuo. La grandezza di questi gradini è di fatto molto piccola. Per ogni determinata frequenza v, l'energia sale di gradini che misurano $h \times v$, dove h è la cosiddetta costante di Planck. In questo numero, che controlla i gradini di energia misurati in joule secondi, dopo la virgola ci sono 33 zeri prima di arrivare a una cifra diversa da zero:

$$h = 6{,}626 \times 10^{-34} \text{ joule secondi.}$$

A questo stadio delle sue ricerche, Planck non era in grado di formulare nessuna spiegazione reale di questi gradini energetici; dal punto di vista matematico, però, il suo modello era proprio quello richiesto per rendere ragione della radiazione elettromagnetica osservata sperimentalmente all'interno di un forno come quello di Papplewick. Fu Einstein, spiegando un altro esperimento, a spingere gli scienziati a considerare la luce più come una particella che come un'onda. E ciascuna di queste particelle aveva un'energia pari a $h \times v$.

Espellere elettroni: l'effetto fotoelettrico

I metalli sono ottimi conduttori di elettricità perché al loro interno ci sono tantissimi elettroni liberi di muoversi. Ciò significa che se sparo delle radiazioni elettromagnetiche contro un pezzo di metallo, posso far sì che questi elettroni vengano espulsi: grazie all'energia presa dall'onda, possono fuggire dai confini del metallo. Questo fenomeno è stato la chiave nella

scoperta dell'elettrone da parte di Thomson, descritta nel precedente Confine.

Se penso la radiazione elettromagnetica come un'onda, dovrei essere in grado di aumentare la sua energia fino a ottenere l'espulsione dell'elettrone: quanto più grande è l'energia dell'onda, tanto più forte sarà il colpo che darò all'elettrone e maggiore sarà la velocità a cui verrà espulso. Come abbiamo visto nel precedente paragrafo, ci sono due modi per incrementare l'energia di un'onda (come la corda vibrante del mio violoncello). Il primo consiste nell'aumentare la sua frequenza (ossia, nel far sì che la corda vibri più in fretta); così facendo, possiamo avere la ragionevole certezza che la velocità degli elettroni espulsi crescerà in modo proporzionale. Se però voglio mantenere costante la frequenza, posso aumentare l'ampiezza dell'onda (ossia, suonare a un volume più alto). La cosa strana è che, malgrado l'incremento dell'intensità dell'onda a una data frequenza, la velocità a cui gli elettroni vengono emessi non subisce variazioni: ad aumentare è il numero di elettroni espulsi dal metallo.

Inoltre, se riduco la frequenza dell'onda accrescendo al contempo la sua ampiezza, posso tenere costante l'energia complessiva; tuttavia, c'è un punto in corrispondenza del quale sembra che io non possa più far espellere nessun elettrone. Ci sono frequenze al di sotto delle quali, a prescindere dal volume a cui suono il mio violoncello, l'energia non provoca l'emissione di elettroni. Per contro, con un'onda ad alta frequenza non conta quanto abbasserò il volume: anche un'onda di intensità bassissima espelle elettroni. Come si spiega questo strano comportamento detto dagli scienziati effetto fotoelettrico?

La risposta sta in un cambiamento di modello. Per adesso, abbiamo considerato il fenomeno in termini di onde che arrivano e particelle che partono. E se invece pensassimo in termini di particelle che arrivano e particelle che partono? Forse la natura corpuscolare dell'elettrone espulso è di fatto la chiave per capire come andrebbe vista la radiazione elettromagnetica in arrivo.

Questo fu il grande cambiamento di paradigma introdotto da Einstein nel 1905, da molti considerato il suo *annus mirabilis* poiché lo scienziato formulò anche la teoria della relatività speciale (di cui parleremo in altri Confini) e la teoria del moto browniano (che, come abbiamo visto nel Confine precedente, fornì la prova più convincente della natura atomica della materia).

Einstein suggerì che la radiazione elettromagnetica (o la luce) non andrebbe vista come un'onda ma, piuttosto, come una scarica da mitragliatrice di minuscole palle da biliardo, proprio come aveva ipotizzato Newton. L'energia di ogni singola particella dipende dalla frequenza della radiazione. Questa nuova idea ci offre un modello in grado di descrivere alla perfezione quello che gli scienziati sperimentavano in laboratorio. Ogni palla da biliardo di luce avrà un'energia corrispondente all'energia minima che Planck aveva introdotto sul piano matematico per formulare la sua spiegazione della radiazione nella fornace. Nel modello di Einstein, la radiazione elettromagnetica di frequenza v andrebbe vista come costituita da palle da biliardo dotate ciascuna di un'energia pari a $h \times v$. I salti di energia introdotti da Planck corrispondevano semplicemente all'aggiunta di altre palle da biliardo di luce alla radiazione. Einstein chiamò queste palle quanti di luce; verso la metà degli anni Venti del Novecento vennero però ribattezzati fotoni, termine con cui li conosciamo oggi.

Il biliardo dei fotoni

In che modo questo modello corpuscolare della luce riesce a spiegare il comportamento degli elettroni espulsi da un metallo? Anche qui, possiamo pensare l'interazione nei termini del gioco del biliardo. I fotoni di luce si schiantano sulla superficie del metallo: se un fotone colpisce un elettrone, la sua energia si trasferisce a quest'ultimo che quindi vola via. L'elettrone deve però ricevere una determinata quantità di energia per poter essere espulso.

L’energia di ogni fotone di luce in arrivo dipende solo dalla frequenza della sua radiazione: se è troppo bassa, l’energia del fotone non sarà sufficiente a provocare l’espulsione dell’elettrone. Non cambia nulla aumentando l’intensità della radiazione: così facendo, infatti, ci limitiamo a sparare un maggior numero di palle da biliardo contro il metallo, ma ognuna di esse avrà sempre la medesima energia. Aumenteranno le probabilità che un elettrone venga colpito, ma dato che ogni palla sarà impotente come tutte le altre, esso non verrà mai espulso. Nel modello ondulatorio, l’elettrone può assorbire l’energia in arrivo finché non ne ha raccolta abbastanza per spiccare il volo; nel modello corpuscolare, invece, posso colpire l’elettrone tutte le volte che voglio, ma nessun singolo colpo sarà sufficiente a provocare la sua espulsione. È come dare leggeri colpetti a qualcuno con un dito: anche se gliene diamo tantissimi in successione, non riusciremo comunque a farlo cadere.

Se però la frequenza della radiazione in arrivo supera un determinato valore, l’energia della palla da biliardo è sufficiente a far sì che l’elettrone da essa colpito venga espulso. È come sostituire le centinaia di colpetti con un forte spintone: il malcapitato ruzzolerà a terra. In sostanza, la palla ha una quantità sufficiente di energia da trasferire all’elettrone il quale potrà vincere le forze che lo legano al metallo. A questo punto, aumentare l’intensità della radiazione significa sparare più palle contro il metallo, facendo così crescere il numero di elettroni emessi; così, anziché vedere elettroni espulsi a velocità maggiore, osserveremo un maggior numero di elettroni espulsi.

Nel modello di Einstein, la velocità dell’elettrone emesso sarà linearmente proporzionale alla frequenza. È interessante notare che questo rapporto non era stato in precedenza osservato o predetto, caratteristica perfetta per una buona teoria scientifica: ovvero essere in grado non solo di spiegare quanto è già stato visto in laboratorio, ma anche di predire qualche fenomeno nuovo da testare in seguito. Un aspetto assai rilevante, dato il profondo scetticismo di molti scienziati riguardo al modello di Einstein. Le equazioni di Maxwell, che descrivevano la radiazione elettromagnetica nei termini della

matematica delle onde, avevano riscosso un tale successo che gli scienziati non avrebbero cambiato idea senza avere davanti qualcosa di molto convincente.

Uno degli scettici era il fisico americano Robert Andrews Millikan, i cui tentativi di confutare il modello corpuscolare di Einstein finirono invece per confermare la predizione einsteiniana secondo cui la velocità degli elettroni in uscita era direttamente proporzionale alla frequenza della radiazione in arrivo. Millikan aveva determinato la carica dell'elettrone nelle sue precedenti ricerche e, in seguito, avrebbe coniato l'espressione raggi cosmici dopo aver dimostrato che la radiazione registrata dai rilevatori sulla Terra era di natura extraterrestre. Per queste attività, Millikan ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1923, due anni dopo Einstein.

Fu per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico che Einstein ricevette il Nobel nel 1921, non per la teoria della relatività! Le sue idee diedero ai sostenitori del modello corpuscolare un motivo per riprendere quella spugna gettata pochi decenni prima, in seguito alle rivelazioni di Maxwell. Una successiva controrivoluzione avrebbe messo in luce che le particelle come gli elettroni hanno caratteristiche che le rendono più simili a onde anziché a particelle discrete. Sembrava quindi che tanto la luce quanto gli elettroni si comportassero sia come particelle sia come onde. Nella nuova teoria emergente, tutti potevano cantare vittoria.

Nonostante il cambiamento di paradigma introdotto da Einstein, gli esperimenti che sembravano trovare una spiegazione migliore nella teoria ondulatoria della luce non erano stati invalidati: per quanto bizzarro, pareva che fossero le circostanze dell'esperimento a determinare quale modello della luce usare. La dualità onda-particella incombeva.

Come ricorderete, era stato l'esperimento di Young con la doppia feritoia a dimostrare in modo più efficace le ragioni per cui la luce andava considerata come un'onda e non come una particella; dal canto opposto, l'effetto fotoelettrico aveva sfruttato la natura particellare dell'elettrone per sostenere la visione della radiazione elettromagnetica come particella. Sarebbe possibile invertire il quadro? Che cosa accadrebbe,

cioè, se prendessimo degli elettroni e li sparassimo contro uno schermo con una doppia feritoia, come Young aveva fatto con la luce? Questo esperimento con gli elettroni avrebbe avuto implicazioni sconvolgenti per la nostra comprensione della realtà.

Sperimentare con gli elettroni

Una delle conseguenze più curiose della fisica quantistica è che, a quanto pare, una particella come un elettrone può trovarsi in più di un posto allo stesso tempo finché non viene osservata; a quel punto, sembra essere il caso a decidere dove è di fatto posizionata. Oggi gli scienziati ritengono che questa sia una forma autentica di casualità: che, cioè, non sia semplicemente il frutto di una mancanza di informazioni. Se ripetiamo l'esperimento nelle stesse precise condizioni, possiamo ottenere ogni volta una risposta differente. In ultima analisi, è proprio questa incertezza oggettiva riguardo alla posizione a determinare che, da un momento all'altro, qualche particella del mio uranio possa ritrovarsi fuori anziché dentro il barattolo sulla scrivania.

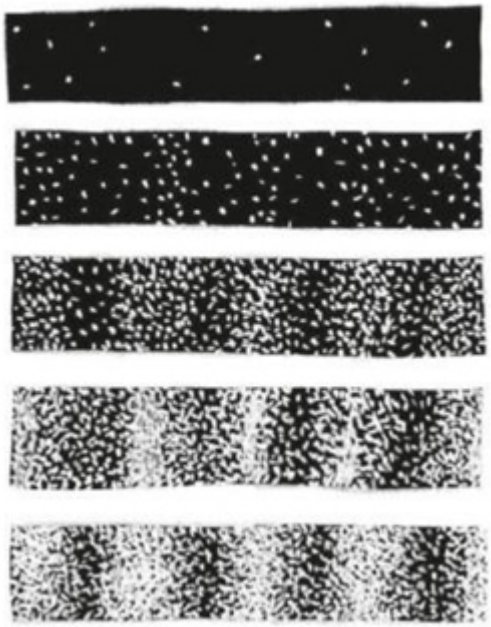
Il modo migliore per illustrare tale fenomeno consiste nel ripetere l'esperimento della doppia feritoia di Young usando gli elettroni al posto della luce. Un mio collega fisico di Oxford mi ha invitato nel suo laboratorio per darmi modo di osservare il bizzarro comportamento di questi elettroni: era una cosa che sapevo già attraverso i libri ma, come disse Kant, «ogni nostra conoscenza parte dai sensi».

Ho sentito il dovere di avvisarlo che io e gli esperimenti non andiamo molto d'accordo. A scuola nessuno voleva lavorare con me in laboratorio perché i miei esperimenti fallivano sempre; è anche per questa ragione che, alla fine, mi sono orientato verso il lato più teorico dell'attività scientifica, dove il caos dell'universo fisico può essere tenuto sotto controllo. Il mio collega, però, mi ha assicurato che con questo esperimento non si correvano rischi.

Per cominciare, abbiamo predisposto una sorgente che emetteva elettroni a un tasso tale da consentirmi di registrarli uno per volta man mano che arrivavano sulla lastra del rilevatore; quindi, ho piazzato lo schermo con due feritoie tra la fonte e la lastra. Per prima cosa, ho osservato ciò che accadeva quando una feritoia rimaneva chiusa: gli elettroni che passavano dall'apertura colpivano la lastra e, dopo che la fonte ne aveva emessi un numero sufficiente, ho iniziato a notare l'emergere di una figura.

La regione direttamente allineata con la fonte e la feritoia registrava l'arrivo di un'elevata intensità di elettroni; da un lato e dall'altro di questa linea centrale venivano ancora rilevati elettroni in arrivo, ma il loro numero calava allontanandosi via via dal centro. Sembrava che, a volte, gli elettroni venissero deviati durante il loro passaggio attraverso la feritoia, finendo così a destra o a sinistra della linea centrale. Fin qui, comunque, non c'era nulla di troppo strano. Poi, però, ho aperto la seconda feritoia.

Se gli elettroni si comportassero come particelle classiche, avrei dovuto vedere due regioni di elevata intensità allineate con le due feritoie, a seconda che l'elettrone passasse dalla prima o dalla seconda. Quello che ho osservato, invece, è stato un ripresentarsi di quella figura di interferenza a cui Young si era trovato davanti nel suo esperimento con la luce, che era in linea con l'analogia di un'onda d'acqua che passa attraverso le feritoie e crea due onde che interferiscono l'una con l'altra.



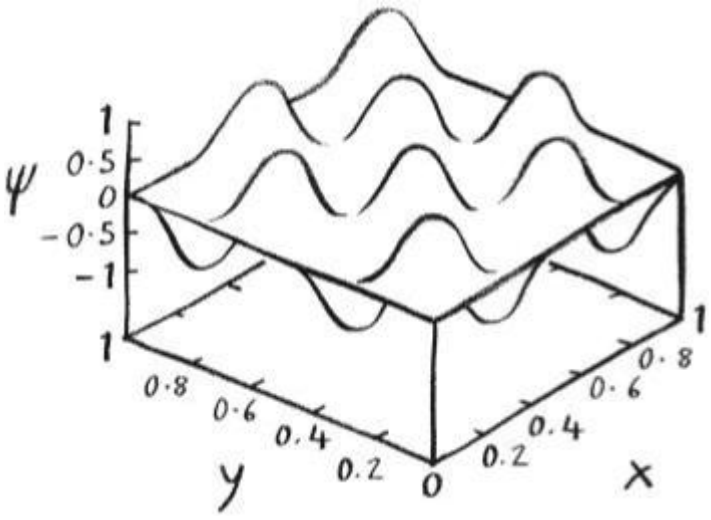
Man mano che il numero di elettroni rilevati cresce, viene a emergere una figura di interferenza simile a quella delle onde.

Tenete però presente che io avevo predisposto l'esperimento in modo che attraverso lo schermo passasse soltanto un elettrone per volta: di conseguenza, non c'erano molti elettroni che interagivano fra di loro come onde, bensì un singolo elettrone che da solo faceva ciò che di solito fa un'onda. La cosa ancora più inspiegabile era che, sulla lastra del rilevatore, c'erano regioni dove non arrivava nessun elettrone, e questo nonostante il fatto che, quando tenevamo aperta una singola feritoia, gli elettroni erano in grado di raggiungere quei punti. Che cosa stava succedendo? Aprendo una seconda feritoia, avevo offerto agli elettroni la possibilità di intraprendere un altro percorso per raggiungere un determinato punto della lastra, ma questa ulteriore possibilità aveva fatto sì che non arrivasse più nessun elettrone.

Kant ha affermato che ogni conoscenza parte dai sensi ma «da qui procede all'intelletto e finisce con la ragione, oltre la quale non c'è nulla di più elevato che possa essere scoperto». In che modo, quindi, gli scienziati trovano una ragione nello strano comportamento dei singoli elettroni che passano attraverso lo schermo?

L'elettrone schizofrenico

Quando l'elettrone passava attraverso una feritoia, come sapeva se l'altra era aperta oppure no? In fin dei conti, era situata a una certa distanza. Non è che l'elettrone si divida in due e passi attraverso entrambe le aperture. La cosa straordinaria è che devo abbandonare l'idea che l'elettrone, prima di essere osservato, si trovi in qualche particolare punto: esso andrebbe invece descritto attraverso una funzione d'onda matematica che ci dà il campo delle sue possibili posizioni. Questo nuovo punto di vista rivoluzionario venne proposto nel 1926 dal fisico austriaco Erwin Schrödinger. L'ampiezza dell'onda codifica la probabilità che, al momento dell'osservazione, l'elettrone si trovi in una determinata regione dello spazio.



Un'onda quantistica: quanto più l'onda è alta, tanto più è probabile che l'elettrone venga trovato in quel particolare punto dello spazio.

Forse vi starete chiedendo: un'onda di cosa? Che cos'è che vibra? In effetti, si tratta di un'onda d'informazione più che di qualcosa di fisico; in modo analogo, quando parliamo di un'ondata di criminalità intendiamo dare un'informazione sull'aumento della probabilità che in una particolare area avvenga un crimine. L'onda non è nient'altro che una funzione matematica, ovvero come una macchina o un computer: voi inserite le informazioni e lo strumento calcola la risposta e ve la fornisce. La funzione d'onda dell'elettrone ha come input una qualsiasi regione dello spazio, e l'output consiste nella probabilità di trovare l'elettrone in quella determinata regione. La cosa sorprendente è che questa particella andrebbe realmente pensata come una struttura matematica in

evoluzione e non come qualcosa di fisico. Parliamo di un'onda perché le funzioni che descrivono queste probabilità presentano molte caratteristiche delle funzioni d'onda classiche. I picchi e i ventri codificano le informazioni su dove potrebbe trovarsi l'elettrone. Quanto più è grande l'ampiezza dell'onda, tanto maggiore è la probabilità di trovare l'elettrone in quella regione dello spazio.

Nel caso dell'elettrone, l'onda che ne descrive il comportamento viene influenzata dalla sua interazione con la doppia feritoia nello schermo: il risultato è una nuova onda le cui caratteristiche producono quella strana figura d'interferenza che ho osservato sulla lastra del rilevatore. È proprio in questo momento, quando viene rilevato, che l'elettrone deve decidere in quale punto della lastra si trova. La funzione d'onda indica la probabilità che l'elettrone appaia nei diversi punti, ma al momento del rilevamento il dado è tratto e le probabilità diventano certezze: l'onda non c'è più e l'elettrone torna a mostrarsi come una semplice particella che colpisce un singolo, determinato punto della lastra. Reiterando l'esperimento, l'elettrone potrà apparire ogni volta da qualche altra parte. Man mano che continuo a sparare elettroni contro lo schermo, sulla lastra viene a formarsi una figura corrispondente ai dati statistici codificati nell'onda; tuttavia, in nessun singolo caso potrò mai sapere in che punto della lastra troverò l'elettrone.

Curiosamente, posso riprendere l'esperimento originale compiuto da Young con la luce e reinterpretarlo alla luce (se mi consentite questo gioco di parole) della scoperta di Einstein che i raggi luminosi sono fatti di particelle chiamate fotoni. Se riduco l'intensità della fonte luminosa nell'esperimento di Young, posso arrivare a un punto in cui l'energia emessa è così bassa che è come sparare contro lo schermo con la doppia feritoia un singolo fotone di luce per volta.

Proprio come nel caso dell'elettrone, quando il fotone arriva sulla lastra fotografica si mostra come un singolo punto corrispondente alla sua natura di particella. Che fine ha fatto allora la figura d'interferenza trovata da Young? Ecco la cosa sorprendente: se continuate a sparare fotoni (uno per volta) contro lo schermo con la doppia feritoia, dopo un certo tempo

l’accumularsi dei puntini di luce sulla lastra fotografica verrà lentamente a mostrare la figura d’interferenza. Young, quindi, non stava osservando una forma d’onda continua che colpiva la lastra: era soltanto un’illusione. In realtà, la figura d’interferenza è formata da miliardi di miliardi di pixel, corrispondenti al rilevamento dell’arrivo di ogni singolo fotone. Per darvi un’idea di quanti fotoni colpiscono la lastra, tenete presente che una lampadina da 100 watt ne emette circa 10^{20} (ossia, 100 miliardi di miliardi) al secondo.

La qualità ondulatoria della luce è la stessa di quella dell’elettrone. L’onda è la funzione matematica che determina la probabile posizione del fotone di luce quando viene rilevato. Parlando di un carattere ondulatorio della luce non ci riferiamo quindi a un’onda di una qualche materia che vibra (come un’onda d’acqua), ma a una funzione graficamente simile a un’onda che codifica le informazioni su dove si potrà trovare il fotone quando verrà rilevato. Fino al momento in cui raggiunge la lastra del rilevatore, il fotone – come l’elettrone – sembra passare simultaneamente attraverso entrambe le feritoie, per poi decidersi riguardo alla sua posizione nello spazio solo quando viene osservato.

È proprio questo atto di osservazione l’aspetto davvero strano della fisica quantistica. Finché non chiedo al rilevatore di individuare dove si trova l’elettrone, la particella andrebbe pensata come distribuita probabilisticamente nello spazio, una probabilità descritta da una funzione matematica dalle caratteristiche simili a quelle di un’onda. Ed è l’effetto delle due feritoie su questa funzione d’onda matematica ad alterarla in modo tale che l’elettrone non potrà più trovarsi in determinati punti della lastra del rilevatore. Quando la particella viene osservata, il dado è tratto e l’onda probabilistica deve scegliere la posizione della particella.

Mi ricordo ancora il Natale in cui per la prima volta lessi questa folle storia su come era possibile che le cose sembrassero trovarsi in più posti al medesimo tempo. Oltre ai dolci e ai giocattoli, Babbo Natale mi aveva portato un curioso libro del fisico George Gamow, *Mr Tompkins in Paperback*. Raccontava la storia dei tentativi del signor Tompkins di imparare la fisica seguendo un ciclo di lezioni serali tenute da

un famoso professore. Il protagonista, però, finiva sempre per addormentarsi a metà lezione.

Nei suoi sogni, il microscopico mondo quantistico degli elettroni si ingrandisce fino a raggiungere le dimensioni del mondo macroscopico, e la giungla quantistica in cui si ritrova è piena di tigri e scimmie situate in più posti allo stesso tempo. Quando un grosso branco di tigri dall'aspetto sfocato lo attacca, il professore che lo accompagna nei suoi sogni spara una salva di proiettili: uno di essi colpisce infine il suo bersaglio e il branco di tigri diventa all'improvviso una singola tigre «osservata».

Ricordo di essere rimasto incantato da questo mondo di fantasia ed ero ancora più eccitato alla prospettiva che queste cose non fossero poi così irreali come potevano sembrare. All'epoca stavo iniziando a nutrire dei dubbi sull'esistenza di Babbo Natale, dato che sarebbe dovuto passare da un miliardo di bambini nel corso di una singola notte, ma il libro rinnovò la mia fede nel personaggio. Era ovvio: Babbo Natale stava sfruttando la fisica quantistica. Finché di fatto nessuno lo osservava, poteva trovarsi in molti camini allo stesso tempo.

Antropologia quantistica

Per sottolineare il ruolo peculiare dell'osservazione, se torno all'esperimento della doppia feritoia e piazzo un rilevatore su una delle aperture per cercare di vedere da dove l'elettrone è «realmente» passato, la figura d'interferenza scompare. L'atto di guardare per quale feritoia passa l'elettrone cambia la natura della funzione d'onda che lo descrive: ora la figura sulla lastra del rilevatore mostra semplicemente due regioni luminose allineate con le due feritoie, senza nessuna figura d'interferenza. Il mio tentativo di scoprire come stanno le cose viene a cambiare il comportamento dell'elettrone.

Anche se l'analogia non è del tutto corretta, per pensare questo fenomeno possiamo immaginare un antropologo che osserva una tribù amazzonica finora sconosciuta. L'osservazione altera il comportamento: è impossibile

osservare la tribù senza interagire in qualche modo con essa, cambiandone quindi il comportamento. Questo è ancora più evidente nel caso dell'elettrone: per sapere da quale feritoia è passato devo «guardare», ma ciò implica una qualche sorta di interazione. Per esempio, l'osservazione potrebbe consistere in un fotone di luce che rimbalza sull'elettrone e ritorna quindi a un detector. Ora, quel fotone deve comportare un qualche cambiamento nel momento, nell'energia o nella posizione dell'elettrone: non può interagire senza che ci sia una qualche alterazione. Ma la verità è che non è necessario che questa interazione sia così palese come nel caso di un fotone che rimbalza sull'elettrone. Può anche essere più sottile. Se osservo per vedere se l'elettrone passa da una feritoia ma non lo rilevo, posso inferire che è passato dall'altra; in questo caso non c'è nessun fotone che rimbalza sull'elettrone, e la posizione di quest'ultimo viene misurata senza interazioni.

C'è un bizzarro esperimento mentale che fa leva sull'atto di osservare il passaggio degli elettroni attraverso le feritoie nello schermo. Supponiamo di costruire una bomba che si innesca quando un singolo elettrone colpisce un sensore. Il problema è che non ci sono garanzie che questa bomba funzioni. In una prospettiva classica, l'unico modo per testarla sembra essere quello, piuttosto inutile, di sparare un elettrone verso il sensore: se scoppia, sappiamo che la bomba funziona, altrimenti è difettosa. Ma anche se andava bene, con il test l'abbiamo ormai perduta.

In realtà posso usare l'esperimento della doppia feritoia per individuare le bombe che funzionano senza farle scoppiare. Come ricorderete, sullo schermo c'erano zone che l'elettrone non poteva colpire se attraversava entrambe le feritoie allo stesso tempo: pertanto, se rilevo un elettrone in uno di questi punti, significa che stavo osservando il suo passaggio e l'ho così costretto a scegliere una delle due aperture. Ora, useremo questa zona come la regione detector della bomba. Piazziamo il sensore in corrispondenza di una delle due feritoie e, se la bomba è difettosa, il sensore non l'attiverà. Se è difettosa e il sensore non funziona, significa che non stiamo facendo nessuna osservazione; di conseguenza, l'elettrone passa

attraverso entrambe le feritoie e non può pertanto colpire la regione detector della bomba.

E se invece non è difettosa? In questo caso, se l'elettrone passa attraverso la feritoia dove è posto il sensore, questo lo rileverà facendo scoppiare la bomba; il che, di per sé, non è proprio un buon risultato. Ma dato che ora sto di fatto osservando attraverso quale apertura passa l'elettrone, questo attraverserà soltanto una feritoia e avrà la possibilità di raggiungere la nostra regione detector della bomba. Di conseguenza, se registro l'arrivo di un elettrone in questa regione, la bomba è funzionante. Una bomba funzionante è un meccanismo di rilevamento: in metà dei casi, l'elettrone è individuato mentre attraversa la feritoia dove è posto il sensore, e la bomba esplode; nell'altra metà, la bomba rileva che l'elettrone è passato attraverso l'altra feritoia, la figura di interferenza non può formarsi e l'elettrone può raggiungere la regione detector della bomba, ma quest'ultima non esplode. L'elettrone ci ha dato un'informazione su quale feritoia ha attraversato, ma l'atto di osservazione non ha implicato il guardare direttamente l'elettrone, il colpirlo con un fotone di luce o il far scoppiare una bomba.

Le strane implicazioni dell'atto di osservazione si possono applicare anche per fermare il decadimento dell'uranio nel barattolo sulla mia scrivania. Continuando a fare un sacco di mini osservazioni nel tentativo di cogliere l'uranio nell'atto di emettere una radiazione, queste possono congelare il materiale e fermare il suo decadimento. È la versione quantistica del vecchio adagio secondo cui se guardi la pentola, l'acqua non bolle; la mia pentola, però, è piena di uranio.

Fu il matematico decrittatore Alan Turing a comprendere per primo che la continua osservazione di una particella instabile poteva in qualche modo congelarla e bloccare la sua evoluzione. Questo fenomeno divenne noto come effetto quantistico di Zenone, in riferimento al filosofo greco secondo il quale una freccia non poteva muoversi perché le immagini istantanee del suo volo non avrebbero mostrato alcun movimento.

Immaginate una particella che può trovarsi in due stati, QUI e LÌ. Se non viene osservata, si trova in un misto dei due, ma l'osservazione la costringe a sceglierne uno soltanto: se decide di essere QUI, dopo l'osservazione ricomincia a evolversi in uno stato misto, mentre se viene osservata di nuovo con sufficiente rapidità, quando è ancora perlopiù QUI, tornerà probabilmente a collassare nello stato QUI. Così, se continuiamo a osservare la particella, non potrà mai evolversi nello stato LÌ fino ad avere una chance di esservi osservata. È come se avessimo due bicchieri mezzi pieni d'acqua e ogni volta che li osserviamo dovessimo versare il liquido da un bicchiere all'altro, riempiendolo fino all'orlo; dopo l'osservazione possiamo iniziare a riempire il bicchiere vuoto, ma se torniamo a osservarlo con sufficiente rapidità ci sarà ancora poca acqua al suo interno e, di conseguenza, la cosa più facile da fare sarà travasarla di nuovo nell'altro bicchiere, ancora quasi pieno. Se le osservazioni continuano a ripetersi in fretta, il bicchiere pieno rimarrà per sempre tale.

I miei figli sono ossessionati dalla serie fantascientifica televisiva *Doctor Who* (lo ero anch'io, alla loro età). Gli alieni più spaventosi sono gli Angeli piangenti, statue di pietra simili a quelle che vediamo nei cimiteri: rimangono immobili finché non distogliamo il nostro sguardo da loro, ma se solo giriamo per un attimo gli occhi possono muoversi. Ora, la teoria fisica dice che il barattolo di uranio sulla mia scrivania è un po' come un Angelo piangente: se continuo a osservarlo (cosa che, com'è ovvio, è un po' più complicata del semplice limitarsi a tenere un occhio sul barattolo…), posso congelarlo al punto da bloccare la sua emissione di radiazioni.

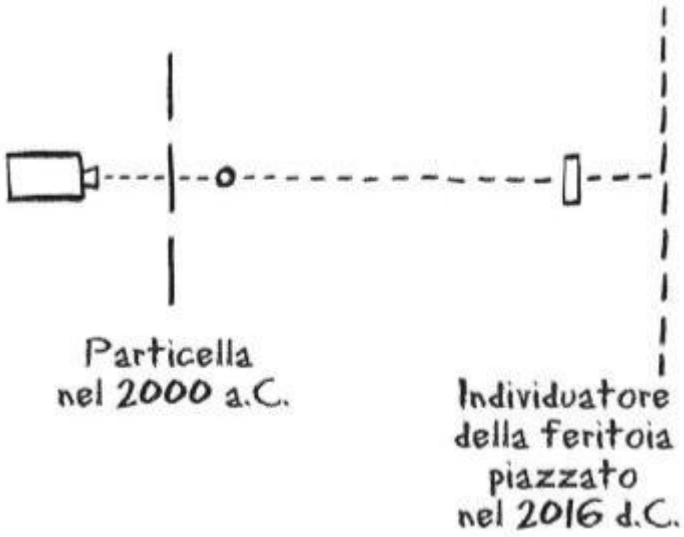
Anche se Turing formulò inizialmente quest'idea come una semplice conseguenza teorica della matematica, nel corso dell'ultimo decennio sono stati compiuti esperimenti che hanno dimostrato la reale possibilità di usare l'osservazione per inibire il progresso di un sistema quantistico.

Molteplici storie

La fisica quantistica sembra implicare che, nell'esperimento della doppia feritoia, l'elettrone ha molteplici futuri finché non lo osservo: a quel punto, il lancio di un qualche misterioso dado quantistico determina quale di questi futuri si attualizzerà. Posso farmi una ragione del fatto che non conoscerò il futuro finché non diventerà il presente. In fin dei conti, se prendo il mio dado con l'intenzione di fare tre lanci, ci sono $6 \times 6 \times 6 = 216$ possibili futuri che si possono concretizzare; il mio atto di lanciare il dado sceglie uno di questi 216 possibili futuri, proprio come l'osservazione dell'elettrone determina una delle sue possibili posizioni. C'è però un altro bizzarro aspetto dell'esperimento della doppia feritoia che ha un'implicazione più inquietante: neanche il passato è determinato in un unico modo.

In effetti, sembra che io possa alterare il passato attraverso le mie azioni nel presente. C'è un modo per vedere da quale feritoia è passato l'elettrone molto tempo dopo che quest'ultimo ha attraversato lo schermo. Lo strumento d'osservazione, che chiameremo individuatore della feritoia, può essere infatti piazzato anche subito prima che l'elettrone colpisca la lastra del rilevatore.

Supponiamo di compiere l'esperimento della doppia feritoia su scala cosmica. Metto il mio emettitore di elettroni a un capo dell'universo, con lo schermo con la doppia feritoia subito davanti, e piazzo quindi la lastra del rilevatore all'altro capo dell'universo. In questo modo, occorreranno molti anni perché l'elettrone possa attraversare lo spazio e colpire infine la lastra; pertanto, quando la particella passa attraverso lo schermo con la doppia feritoia, non so ancora se lo osserverò con il mio individuatore della feritoia oppure no.



La decisione di mettere l'individuatore della feritoia sul percorso della particella, presa nel 2016 d.C., può alterare ciò che la particella ha fatto nel 2000 a.C.

Se, anni dopo, utilizzo l'individuatore della feritoia, significa che, molti anni prima, l'elettrone dev'essere passato attraverso una sola delle due feritoie; se invece non mi avvalgo di questo strumento, significa che anni prima l'elettrone dev'essere passato attraverso entrambe. Ciò è alquanto bizzarro: le azioni che compio all'inizio del XXI secolo possono cambiare quello che è accaduto migliaia di anni prima, quando l'elettrone ha iniziato il suo viaggio. Sembra quindi che, come ci sono molteplici futuri, ci siano anche molteplici passati, e i miei atti di osservazione nel presente possono decidere ciò che è avvenuto nel passato. Oltre a mettere in discussione la nostra conoscenza del futuro, la fisica quantistica mette in dubbio anche la nostra possibilità di conoscere davvero il passato. Il quale pare ritrovarsi in una sovrapposizione di possibilità che si cristallizzano solo quando vengono osservate.

Una personalità multipla

A mio avviso, il punto interessante – e spesso trascurato – è che, fino al momento dell'osservazione, la fisica quantistica è del tutto deterministica. Non ci sono dubbi sulla natura dell'equazione d'onda che descrive l'elettrone durante il suo passaggio attraverso le feritoie. Quando sviluppò la sua teoria, nel 1926, Schrödinger formulò l'equazione differenziale che

predice in modo del tutto deterministico l'evoluzione della funzione d'onda. In un certo senso, non è meno deterministica delle equazioni del moto di Newton.

Il carattere probabilistico e l'indeterminazione emergono quando osservo la particella e cerco di estrarre informazioni classiche. Il nuovo aspetto nonclassico e bizzarro è questo cambiamento discontinuo che sembra verificarsi quando l'onda viene «osservata»: all'improvviso, il determinismo pare svanire e rimaniamo con un elettrone posizionato a caso in un qualche punto dello spazio. Sul lungo periodo, la causalità è descritta dalle informazioni contenute nella funzione d'onda, ma in ogni singolo caso non sembra esserci nessun meccanismo identificato dagli scienziati che mi consenta di stabilire dove, in questo particolare esperimento, verrà a trovarsi l'elettrone. Le cose stanno davvero così? La posizione dell'elettrone è qualcosa che non sarò mai in grado di predire prima di compiere l'osservazione?

Quando faccio un'osservazione o una misurazione, si verifica questo strano salto che localizza la particella in un determinato punto. Subito dopo, però, l'evoluzione della particella è descritta da un'altra funzione d'onda, fino alla successiva misurazione e al nuovo salto. Schrödinger odiava questi cambiamenti discontinui nel comportamento delle particelle: «Se tutti questi dannati salti quantistici fossero davvero qui per restare, dovrei pentirmi di aver avuto a che fare con la teoria quantistica».

Dovremmo fare attenzione a non sopravvalutare il ruolo degli esseri umani in queste osservazioni. Anche i vermi, presumibilmente, possono far collassare la funzione d'onda. E non sono solo le creature viventi a fare le misurazioni: ci sono particelle, dall'altro capo di un universo che potrebbe anche essere privo di vita, che interagiscono con oggetti inanimati, facendo collassare la funzione d'onda e costringendola a prendere una decisione sulle proprietà della particella. Questa interazione è un atto di osservazione proprio come le mie ricerche sperimentali in laboratorio. L'universo è inondato di radiazioni che gettano una luce su tutto quello che incontrano. È per questo motivo che l'universo appare classico e non in un

costante stato di indeterminazione? Questa domanda è legata a un'idea che i fisici chiamano decoerenza.

Trovo davvero difficile farmi una ragione dell'idea secondo cui l'osservazione segna uno spartiacque tra un elettrone deterministico descritto da una funzione d'onda e un elettrone che all'improvviso si ritrova in una particolare posizione stabilita soltanto dal caso. Mi pare folle. Eppure, come strumento di calcolo, quest'idea funziona. «Chiudete il becco e fate i calcoli» si dice che abbia risposto il fisico David Mermin a quelli che, come me, sono insoddisfatti di questa mancanza di conoscenza. Il principio è lo stesso di quando applichiamo la teoria della probabilità al lancio dei dadi: il dado sarà anche controllato dalle equazioni di Newton, ma la teoria della probabilità è lo strumento migliore che abbiamo per calcolare come si potrebbe comportare.

Ma per quanto possa rassegnarmi a chiudere il becco, non riesco a fare a meno di pensare che le obiezioni sono valide. Gli strumenti di cui mi servo per fare una misurazione in un sistema fisico sono fatte di particelle che obbediscono alle leggi della fisica quantistica come il singolo elettrone che sto tentando di osservare. E io stesso, in fin dei conti, sono soggetto a queste leggi! Anch'io non sono altro che un insieme di particelle che obbediscono alle leggi quantistiche. Anche l'osservatore, che sia una lastra fotografica o una persona, fa indubbiamente parte del mondo della fisica quantistica ed è a sua volta descritto da una funzione d'onda. L'interazione fra la funzione d'onda dell'elettrone e l'osservatore pure dovrebbe essere descritta da un'onda. In fin dei conti, da che cosa è costituita un'osservazione o una misurazione?

E se lo strumento, l'osservatore e la particella che passa attraverso le feritoie sono tutti descritti da una funzione d'onda, non sarà forse tutto deterministico? All'improvviso, quindi, la casualità scompare. Perché i fisici affermano che l'atto di osservazione fa collassare la funzione d'onda quando, in verità, c'è all'opera una mega funzione d'onda che descrive tutte le particelle in gioco (l'elettrone, lo strumento, io stesso)? Dov'è la linea di divisione tra il mondo quantistico della probabilità e il mondo classico delle certezze? Tutta questa visione dualistica di un mondo microscopico quantistico e di

un mondo macroscopico classico sembra un po' sospetta. Senza dubbio, l'intera faccenda dovrebbe essere descritta attraverso una funzione d'onda. Tutto questo è molto insoddisfacente, ma la verità è che la maggior parte dei fisici si limita a seguire il consiglio di Mermin e ad andare avanti così. Il mio collega Philip Candelas ha raccontato l'aneddoto di come un giovane e promettente laureato, per cui tutti nutrivano grandi aspettative, fosse all'improvviso scomparso. Che cosa era successo? Una tragedia famigliare? Una malattia? I debiti? Niente di tutto questo, scoprì Candelas: «Aveva tentato di comprendere la meccanica quantistica».

Suppongo di aver dimenticato il consiglio che Feynman dava a quelli che, come me, stavano cercando di accostarsi alla fisica quantistica: «Se potete evitarlo, non continuate a ripetervi "Ma com'è possibile che le cose stiano così?", perché altrimenti finirete per sprofondare in un vicolo cieco da cui nessuno è mai riuscito a uscire. Non c'è nessuno che sappia com'è possibile che le cose stiano così.»

Detto questo, ci sono diversi modi in cui le persone hanno tentato di venire a capo di questa indeterminazione apparentemente intrinseca. Uno consiste nell'ipotesi che, al momento dell'osservazione, la realtà si dissoci in una sovrapposizione di più realtà: in ognuna, il fotone (o l'elettrone) è situato in una posizione differente, così che, in un certo senso, l'onda non collassa ma rimane, descrivendo l'evoluzione di tutte queste diverse realtà. È solo che noi, come esseri consapevoli, siamo ora bloccati in una delle realtà e non possiamo accedere alle altre, in cui il fotone (o l'elettrone) è finito su qualche altro punto della lastra fotografica.

Questo è un affascinante tentativo di dare un senso alla teoria fisica. Si chiama «interpretazione dei molti mondi» ed è stata proposta nel 1957 dal fisico americano Hugh Everett. La domanda interessante, a mio avviso, è se potremo mai sapere che là fuori ci sono questi molti mondi che esistono simultaneamente al nostro. Nessuno ha finora trovato un modo per testare o sondare questi altri mondi, ammesso che esistano. La teoria ipotizza che ci sia soltanto una singola funzione d'onda che descrive l'evoluzione dell'universo in modo

completamente deterministico; è un ritorno a Newton e a Laplace, ma con una nuova equazione.

Il problema, per quanto ci riguarda, è che, proprio in quanto siamo parte di questa funzione d'onda, non possiamo avere accesso alle altre sue parti. Siamo intrappolati all'interno, confinati in un singolo ramo della realtà; e, forse, non potremo mai entrare in contatto con questi altri mondi proprio per un carattere intrinseco della nostra esperienza cosciente. Però, possiamo almeno usare la matematica per analizzare ciò che sta avvenendo sugli altri rami? Io osservo l'elettrone in questo punto della lastra del rilevatore, ma so che la funzione d'onda descrive quello che sta succedendo su tutti gli altri rami della realtà: non posso vederli, ma almeno descriverli matematicamente sì. Certo, così come l'elettrone, anche io esisto in molti mondi: sugli altri rami, ci sono copie di me che osservano l'elettrone mentre colpisce altre regioni della lastra.

Questo modello di realtà è molto intrigante, e può avere un impatto diretto sulla nostra idea di coscienza. Tornerò sul tema della coscienza nel Sesto Confine, ma già qui emergono problemi interessanti sulla sua possibile relazione con il comportamento di questa funzione d'onda. Perché sono consapevole soltanto di un singolo risultato dell'impatto dell'elettrone sulla lastra? La mia consapevolezza di ciò che accade intorno a me è vincolata a qualche determinata versione dell'elettrone che colpisce la lastra? Lo strumento all'interno del mio cranio non è in grado di elaborare molteplici mondi? Guardo fuori dalla finestra, e i fotoni emessi dalla casa di fronte entrano nel mio occhio e vengono rilevati sulla mia retina. Perché non mi capita mai di guardare fuori e vedere i numeri civici 14 e 16 invertiti fra loro?

Questo tentativo di dare un senso a ciò che accade cerca di fatto di spiegare che il salto causato dall'atto di osservazione non è reale bensì soltanto qualcosa che avviene nella mente: il salto da noi percepito non si sta realmente verificando. Questa sorta di interpretazione, però, solleva il problema di che cosa cerchiamo di fare quando diamo una spiegazione scientifica del mondo.

Che cos'è la scienza? In che modo cerchiamo di procedere nella nostra interazione con l'universo? È solo attraverso la misurazione e l'osservazione che conosciamo qualcosa. Le equazioni matematiche possono dirci che cosa ci dobbiamo aspettare, ma finché non misuriamo queste sono soltanto ipotesi. È quindi curioso che il nostro unico modo di «conoscere» qualcosa sull'universo consista nell'osservare e far sì che la luce e le particelle si decidano su dove sono e che cosa stanno facendo. Prima di questa osservazione, è tutto una semplice fantasia? Non posso misurare un'intera funzione d'onda, posso solo conoscerla matematicamente. Una funzione d'onda quantistica fa quindi parte dell'universo che non possiamo mai conoscere, in quanto non possiamo conoscere davvero qualcosa senza fare misurazioni? La misuriamo nel momento in cui collassa. Forse è soltanto bramosia credere di poter conoscere più di quello che posso misurare. Hawking ha senz'altro espresso una visione simile:

> Io non chiedo che una teoria corrisponda alla realtà, perché non so che cosa sia. La realtà non è una qualità che possiamo testare con la cartina al tornasole. Tutto quello che chiedo alla teoria è che predica i risultati delle misurazioni.

Un input, molteplici output

Il mio principale problema con l'attuale interpretazione dominante della fisica quantistica è che se compiamo due volte l'esperimento della doppia feritoia, alle stesse precise condizioni, possiamo ottenere risultati differenti. Ciò va contro tutto quello in cui credo. È il motivo per cui sono stato attratto dalla matematica: la certezza della dimostrazione che esistono infiniti numeri primi significa che, la prossima volta che controllo, non potrò scoprire all'improvviso che questi numeri sono invece finiti. Credevo che, in ultima analisi, la scienza fosse fatta di certezze analoghe, anche se magari noi, come esseri umani, potremmo non avere accesso a tutte. Quando lancio il mio dado, so che la matematica della teoria del caos implica che potrei non essere mai in grado di calcolare il risultato; se non altro, però, la matematica mi dice che se lo lancio partendo dallo stesso punto, atterrerà con la medesima

faccia rivolta verso l'alto. Ora, invece, la fisica sviluppata in questo Confine viene a mettere fondamentalmente in discussione che le cose stiano così.

Nel caso del dado, quando parliamo di probabilità ci riferiamo a una mancanza di informazioni. Nella fisica quantistica, invece, il discorso non riguarda il fatto che il fisico non conosce il quadro completo della situazione: anche qualora conoscessi tutto, la probabilità e il caso rimarrebbero. Stando alle odierne interpretazioni della fisica quantistica, se lancio il dado partendo dallo stesso punto posso ottenere risultati diversi: il medesimo input può portare a molteplici output.

Qualcuno si chiederà che senso abbia parlare di rifare un esperimento nelle stesse precise condizioni; e, in effetti, ciò risulta impossibile. A livello locale potremmo anche riprodurre condizioni esattamente identiche, ma l'esperimento andrebbe inquadrato nel contesto dell'universo, che è andato avanti. Non possiamo riavvolgere la funzione d'onda dell'universo e farla ripartire. L'universo è un esperimento irripetibile che include anche noi come parte della sua funzione d'onda. Ogni osservazione viene ad alterare la funzione d'onda dell'universo, e non c'è modo di tornare indietro.

E se la realtà fosse davvero casuale e non deterministica come vorrei? Nelle sue *Lectures on Physics*, Feynman afferma: «Al momento attuale, dobbiamo limitarci a calcolare le probabilità. Diciamo "al momento attuale", ma abbiamo il forte sospetto che sarà per sempre così: che è impossibile risolvere il puzzle, che la natura *è* davvero fatta così».

Sembra quindi che la cosa davvero casuale sulla mia scrivania non sia il dado che ho preso a Las Vegas, ma piuttosto il barattolino di uranio che ho comprato su Internet.

6

«Tutti questi cambiamenti sono sconcertanti! Non so mai con certezza che cosa diventerò fra un momento.»

LEWIS CARROLL, *Le avventure di Alice nel Paese delle Meraviglie*

Devo ammettere che la natura controintuitiva del mondo quantistico mi sta dando grossi problemi. A quanto pare, comunque, è un buon segno: come ebbe a dire il fisico Niels Bohr, «se la fisica quantistica non vi ha profondamente sconvolti, significa che non l'avete ancora capita».

Richard Feynman si spinse addirittura oltre, dichiarando che «non c'è nessuno che abbia capito la fisica quantistica». Nel corso di un discorso d'apertura tenuto quando aveva più di sessant'anni, ammise: «Potrei confessare subito che abbiamo sempre incontrato (segreto, segreto, chiudete le porte!), che abbiamo sempre incontrato, dicevo, un sacco di difficoltà nel comprendere la visione del mondo rappresentata dalla fisica quantistica. Mi mette in ansia ancora oggi».

Il matematico che è in me vorrebbe che un qualche meccanismo deterministico potesse dirmi quando il mio barattolo di uranio emetterà la sua prossima particella. Dal canto opposto, il carattere probabilistico della fisica quantistica rappresenta una sfida alla mia capacità di anticipare ciò che accadrà. Le equazioni del moto di Newton mi offrivano un'eccitante possibilità: conoscendo la quantità di moto e la posizione di una particella, avrei potuto calcolare la completa evoluzione del suo comportamento nel futuro. Inoltre, ripetendo lo stesso esperimento con un'altra particella

situata nella medesima posizione e con la stessa quantità di moto, questa si sarebbe comportata come la prima.

Ma questa speranza di poter conoscere il futuro nel 1927 è stata schiacciata dalle rivelazioni fatte da Heisenberg, che ci ha spiegato come l'affermazione «conosco la quantità di moto e la posizione di una particella nello stesso istante» di fatto non abbia senso. Sembra esserci un rapporto elastico tra la conoscenza della posizione di una particella e quella della sua quantità di moto: a quanto pare, se misuro la posizione di una particella con crescente precisione, la sua quantità di moto assumerà un'intera gamma di diversi possibili valori. È ciò che afferma il famoso principio di indeterminazione di Heisenberg, che rappresenta forse la più grande sfida alla nostra possibilità di conoscere. E, come vedremo, tale principio spiega il motivo per cui l'uranio sulla mia scrivania emette casualmente delle particelle.

Lo stesso Heisenberg espresse con chiarezza l'importanza di essere pronti a resettare la propria visione del mondo alla luce delle nuove rivelazioni: «Quando ci lasciamo alle spalle le cose che ci sono note per addentrarci nel campo dell'ignoto, possiamo sperare di comprendere qualcosa di nuovo; ma forse, allo stesso tempo, dobbiamo anche imparare un nuovo significato del termine "comprensione"».

Più che farci conoscere le risposte a vecchie domande, la fisica quantistica viene a mettere in discussione quali sono le domande che ci possiamo porre.

Tappeti quantistici

Il cuore della scoperta di Heisenberg è il seguente. Supponiamo che io prenda una delle particelle del mio uranio: se so che questa particella è a riposo e non si sta muovendo, ne segue che non posso sapere dove è situata. Di fatto, ci sarebbe una chance di trovarla in un qualunque punto dell'universo. Dal canto opposto, se cerco di individuare con precisione dove si trova, all'improvviso non sono più in grado di sapere se e come si sta muovendo: da un momento all'altro, quella che

pareva essere una particella a riposo si ritrova a muoversi in qualunque direzione.

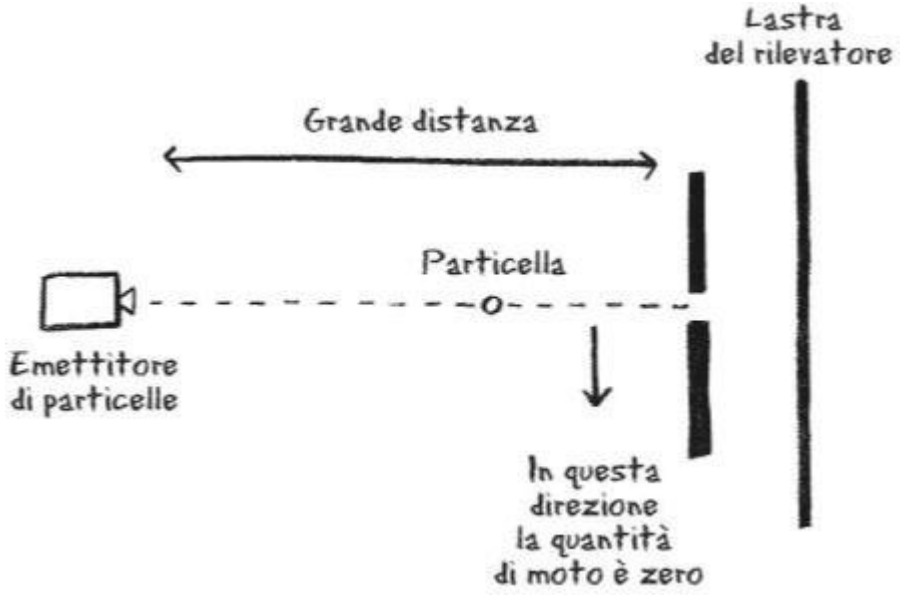
Sembra una cosa totalmente folle. Se lancio il mio dado in aria e lo osservo con attenzione mentre cade sul tavolo, non mi aspetto che la mia conoscenza della sua posizione lo porti all'improvviso a volar via in una direzione del tutto nuova. Questa intuizione, però, si applica solo agli oggetti di grande massa. Quando quest'ultima è grosso modo pari a quella di un elettrone, le cose vanno proprio così: se determino la posizione della particella con una precisione pari al raggio di un atomo, la sua velocità potrebbe cambiare addirittura di 1000 chilometri al secondo, in qualunque direzione.

È come cercare di sistemare uno strano tappeto quantistico: ogni volta che metto a posto una sua estremità (corrispondente alla posizione), l'estremità opposta (corrispondente alla quantità di moto) si solleva e fa le pieghe, e viceversa.

Per comprendere questa relazione elastica tra posizione e quantità di moto, torniamo al nostro schermo con le feritoie. Abbiamo visto il bizzarro comportamento di una particella sparata contro uno schermo con due feritoie, ma la strana tensione tra la posizione e la quantità di moto delle particelle era già emersa con il loro passaggio attraverso una singola feritoia. Avevo osservato che negli esperimenti si registra una certa diffusione delle particelle che attraversano la singola feritoia; ma, pensandoci meglio, perché un elettrone dovrebbe subire una qualche deflessione quando passa dalla feritoia? Perché una particella di dimensione trascurabile come un elettrone non la attraversa procedendo diritta? Come si spiega la fascia di possibili punti sulla lastra dove può finire quando emerge dalla feritoia? È proprio questo scambio tra conoscenza della posizione e conoscenza della quantità di moto a spiegare la diffusione che osservo.

Posso fare in modo che l'elettrone venga sparato da una fonte remota, così da avere la garanzia che, se passa attraverso la feritoia, significa che non c'era nessun movimento nella direzione perpendicolare a quest'ultima: in altre parole, quando la particella entra nella feritoia, sappiamo che la sua

quantità di moto in questa direzione è zero. Questa è una conoscenza precisa.



Se penso l'elettrone come una particella di dimensione trascurabile, ne segue che o passa attraverso la feritoia in modo pulito, oppure non passa. Se passa, ho una conoscenza molto precisa della sua posizione, con un margine di accuratezza dato dalla larghezza della feritoia stessa. A questo punto, dovrei poter predire con precisione dove colpirà la lastra: dato che la sua quantità di moto nella direzione perpendicolare alla feritoia era zero, dovrebbe colpire una regione della lastra con una larghezza esattamente pari a quella della feritoia. Perché, quindi, con l'aumentare del numero di elettroni sparati, ottengo sulla lastra quella stessa fascia di diffusione che ho osservato nel caso delle onde? Perché gli elettroni non arrivano tutti in una regione con la stessa larghezza della feritoia?

Il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che ogni misurazione che determina la posizione precisa dell'elettrone comporta l'emergere di una nuova indeterminazione nel valore della sua quantità di moto. Così, per esempio, se l'elettrone è passato attraverso la feritoia, conosco la sua posizione con un margine di errore dato dalla larghezza di quest'ultima. Man mano che tale larghezza viene ridotta, il margine d'errore diminuisce, ma ciò fa sì che la fascia di diffusione diventi sempre più ampia. Perché? Perché il valore della quantità di moto viene alterato: era zero (nella

direzione perpendicolare alla feritoia) quando la particella si stava avvicinando allo schermo, ma quando l'elettrone attraversa la feritoia e la sua posizione viene stabilita con precisione, la sua quantità di moto diventa indeterminata. Ho tirato il tappeto quantistico dalla parte della posizione e, di conseguenza, l'estremità della quantità di moto si è sollevata ed è andata fuori posto.

Siamo davanti a una situazione molto strana. Inoltre, la precisa entità della variazione nella quantità di moto è qualcosa che non posso calcolare in anticipo: la posso misurare soltanto a posteriori, mentre prima mi devo accontentare di una gamma di possibili valori che la quantità di moto potrà venire ad assumere. E non solo: se ripeto lo stesso esperimento, vedrò che l'alterazione nella quantità di moto non è determinata dalle condizioni sperimentali. Tutto quello che abbiamo è un meccanismo probabilistico che si limita a dirci in che gamma di valori possiamo aspettarci di trovare tale variazione.

Quantificare l'indeterminazione

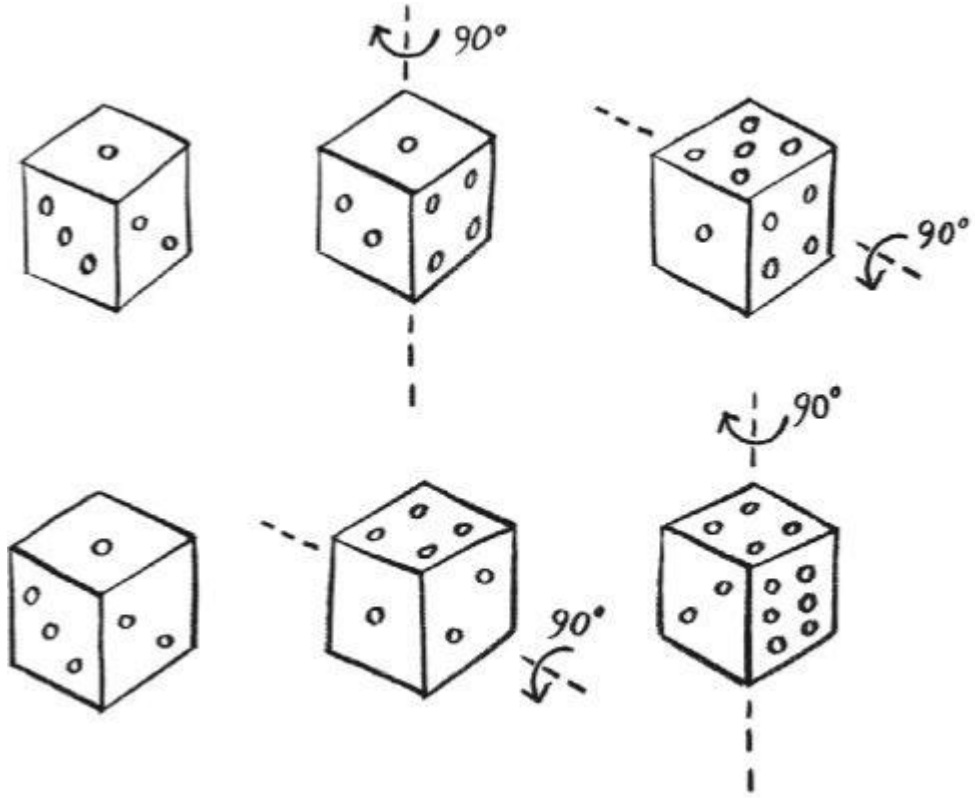
Il principio di indeterminazione di Heisenberg non è una dichiarazione vaga, ma è qualcosa che ci consente di fatto di quantificare la perdita di conoscenza. Quando conosco la posizione dell'elettrone con una precisione elevata, la sua quantità di moto all'uscita dalla feritoia non è più pari a zero (nella direzione perpendicolare alla feritoia stessa), ma può variare statisticamente attorno al valore medio di 0. Non posso sapere in anticipo quale valore otterrò quando misurerò la sua quantità di modo (essendo ancora indeterminata), ma i possibili valori saranno statisticamente distribuiti sopra e sotto il valore medio di 0. Posso misurare in termini statistici l'estensione del campo di questa distribuzione attraverso la cosiddetta deviazione standard della quantità di moto, indicata con Δp: quanto più è grande tale estensione, tanto più sarà elevato il valore di Δp e più crescerà la nostra incertezza riguardo al valore della quantità di moto.

Procedendo sulle basi del lavoro di Heisenberg del 1927, che illustrava questa strana relazione inversa tra la conoscenza della posizione e la conoscenza della quantità di moto, Earle Kennard e Howard Robertson dedussero matematicamente lo scambio in termini di conoscenza. Se il campo dei possibili valori della posizione ha una deviazione standard di Δx, mentre la deviazione standard per quanto riguarda la quantità di moto è Δp, questi due valori soddisferanno la seguente disuguaglianza:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

dove h è la costante di Planck, lo stesso numero che abbiamo già incontrato discutendo dell'energia di un fotone di luce. La disuguaglianza afferma che se il campo dei possibili valori per la posizione (misurato da Δx) si riduce, quello dei possibili valori per la quantità di moto (misurato da Δp) deve crescere. È una conseguenza matematica della fisica quantistica: più aumenta la nostra conoscenza riguardo alle possibili posizioni di una particella, più si allarga lo spettro dei possibili valori della sua quantità di moto. Accade nel caso dell'elettrone che passa attraverso una singola feritoia.

La natura intrinsecamente collegata di queste due proprietà è una conseguenza del fatto che l'ordine in cui faccio le mie misurazioni è fondamentale: gli atti di misurare la posizione e la quantità di moto sono descritti matematicamente da due operazioni che danno risposte differenti se fatte in un ordine diverso. Per illustrare questo concetto, posso prendere il mio dado. Supponiamo che lo ponga sul tavolo con la faccia con l'1 rivolta verso l'alto, come nella seguente figura. Ruoto quindi il dado di un quarto di giro attorno all'asse verticale che passa per la faccia superiore, dopodiché lo ruoto di un altro quarto di giro attorno a un asse orizzontale che passa per una delle facce laterali; a questo punto, la faccia rivolta verso l'alto sarà quella con il 5. Se però rimetto il dado nella posizione di partenza e ripeto le mosse in ordine inverso, facendo prima la rotazione sull'asse orizzontale e poi quella sull'asse verticale, ottengo un esito differente: la faccia rivolta verso l'alto sarà quella con il 4.



Tutte le misurazioni che hanno questa proprietà – cioè, quando le traduciamo in operazioni matematiche, l'ordine in cui vengono eseguite è fondamentale – daranno origine a un principio di indeterminazione: è una semplice conseguenza matematica di questa proprietà, chiamata non commutatività.

Gran parte della natura controintuitiva della fisica quantistica dipende dalla matematica che sta alla sua base. Immergendomi in libri e articoli sulla fisica quantistica, mi è sembrato di entrare in un labirinto. Prima di iniziare il mio viaggio, pensavo di sapere dove mi trovavo. Quindi, grazie alle mie competenze matematiche, mi sono fatto strada con la logica attraverso i tortuosi passaggi del labirinto; ho dovuto farmi guidare dalla matematica perché le sue pareti erano troppo alte per permettermi di intuire qualcosa sul mondo circostante. Ma una volta che la matematica mi ha condotto all'uscita e ho provato a dare un senso al posto dove sono arrivato, ho notato che non assomigliava per niente a quello da cui ero partito.

Non ho nulla da ridire sulla matematica: è il tentativo di interpretare il posto dove mi ha portato a essere difficile. È quasi come se non avessimo un linguaggio per ritradurre ciò

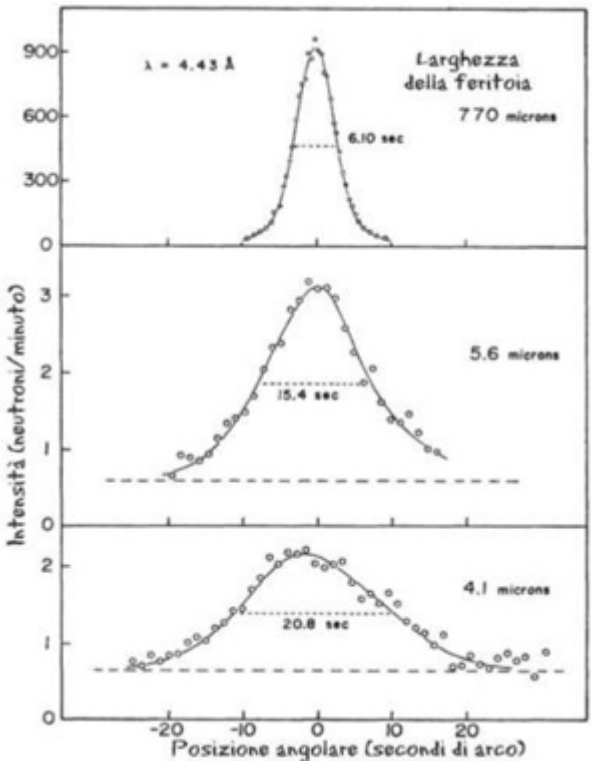
che la matematica ci dice sulla realtà. Forse i problemi che sto incontrando non sono affatto reali, ma sono solo una conseguenza dei limiti posti dal nostro vecchio linguaggio e dalle nostre vecchie teorie sul mondo. La fisica quantistica è come la tana del coniglio di Alice: se vi cadiamo dentro, dobbiamo resettare la nostra visione e formulare un nuovo linguaggio che ci consenta di muoverci in questo mondo dall'altra parte dello specchio. E, nel bene o nel male, questo linguaggio è la matematica.

Ma possiamo fidarci della matematica? Questo comportamento predetto dalla matematica del principio di indeterminazione di Heisenberg è stato confermato per via sperimentale. In un articolo pubblicato nel 1969, il fisico americano Clifford Shull ha descritto i risultati di un esperimento in cui i neutroni erano stati sparati attraverso delle feritoie via via più strette. L'incremento di conoscenza riguardo alla posizione dei neutroni (determinato dalla minore larghezza della feritoia) portava, come predetto dalla teoria, a una maggiore estensione del campo dei possibili valori della quantità di moto; e quando i neutroni arrivavano sulla lastra del rilevatore, la deviazione standard della loro distribuzione corrispondeva con esattezza a quella prevista dall'equazione del principio di indeterminazione di Heisenberg.

Il semplice fatto di conoscere qualcosa di più sulla posizione del neutrone portava a un potenziale cambiamento nella sua quantità di moto. Il principio di indeterminazione di Heisenberg cattura in un'equazione il fatto che non possiamo mai conoscere tutto: un incremento in ciò che sappiamo dev'essere sempre pagato con un corrispondente incremento in ciò che ci è ignoto.

Quando stringiamo la presa su uno dei valori, l'altro si fa più indeterminato. Ora, questa indeterminazione può avere alcune conseguenze inattese. Se chiudo un elettrone in una scatola microscopica, la sua posizione sarà nota con un elevato grado di accuratezza, ma ciò fa sì che i possibili valori della sua quantità di moto siano distribuiti su un campo enorme. Se cerco di misurare la quantità di moto, la funzione d'onda collassa, portando a un'intera gamma di differenti valori che la quantità di moto potrebbe assumere.

Una volta che ho misurato la quantità di moto, potreste pensare che ora conosco sia quest'ultima sia la posizione. In realtà, però, la misurazione della quantità di moto fa sì che la posizione divenga indeterminata: le possibili posizioni dell'elettrone vengono a distribuirsi attraverso lo spazio, al punto da far entrare in gioco il cosiddetto effetto del tunnel quantistico, per il quale la particella che pensavamo rinchiusa dentro la scatola può all'improvviso apparire al suo esterno. È questo fenomeno a essere responsabile dell'emissione di una particella alfa da parte dell'uranio che tengo sulla scrivania.



L'esperimento di Clifford Shull ha confermato che col diminuire della larghezza della feritoia, la diffusione statistica delle posizioni dei neutroni viene a estendersi su un campo più ampio.

Una particella alfa è una parte del nucleo dell'uranio e consiste di due protoni e due neutroni. Il nucleo, in questo caso, è come la microscopica scatola che contiene la particella alfa. In genere, le particelle non hanno abbastanza energia per fuggire dai confini del nucleo; di conseguenza, la loro velocità – e, quindi, la loro quantità di moto – può essere conosciuta con un alto grado di accuratezza. Ne segue che, per il principio di indeterminazione di Heisenberg, la posizione di queste particelle non sarà definita con altrettanta chiarezza: di fatto, c'è anche la possibilità che la loro posizione sia localizzata

all’esterno del nucleo, e in tal caso la particella in questione può evadere. Questa indeterminazione nella posizione è quindi responsabile del fatto che l’uranio può emettere radiazioni.

Limiti alla conoscenza su piccola scala

Il principio di indeterminazione non spiega soltanto l’imprevedibilità del mio barattolo di uranio, ma pone anche dei limiti alla conoscenza a cui posso accedere quando cerco di guardare sempre più da vicino ciò che avviene all’interno del mio dado.

Se tento di misurare con precisione le coordinate di uno degli elettroni del mio dado, man mano che il margine di errore nelle coordinate si restringe, questa maggiore conoscenza viene pagata con un aumento dell’indeterminazione nella quantità di moto e, quindi, nell’energia. Le equazioni di Heisenberg determinano il rapporto matematico che regola questo scambio. Ma c’è anche un’ulteriore complicazione: dato che energia e massa sono collegate dall’equazione einsteiniana $E = mc^2$, se l’energia è abbastanza elevata il processo può condurre alla creazione spontanea di nuove particelle. Il problema è che se mentre sto cercando di stabilire la posizione di una particella vengo a crearne molte altre, ogni tentativo di indagare sulla posizione della particella originale risulta significativamente compromesso. La scala su cui questa complicazione inizia a farsi sentire è chiamata la lunghezza d’onda Compton di una particella: per un elettrone, è di circa 4×10^{-13} metri.

Su scale più piccole, le cose si fanno ancora più indeterminate. C’è un punto in corrispondenza del quale l’indeterminazione nell’energia è talmente elevata che la massa corrispondente diventa così grande da causare il materializzarsi di un buco nero. Come vedremo nel Quinto Confine, sembra che un buco nero, per sua stessa natura, intrappoli ogni informazione all’interno di un certo raggio dal suo centro, impedendone il rilascio.

Ciò significa che il principio di indeterminazione pone un limite intrinseco alla mia possibilità di sondare in profondità la natura: a quanto pare, oltre una determinata scala non ho più accesso a ciò che sta accadendo. Si tratta di una scala molto ridotta, dell'ordine di $1{,}616 \times 10^{-35}$ metri, una distanza nota come la lunghezza di Planck. È un valore incredibilmente piccolo. Se ingrandissi il punto al termine di questo periodo fino a portarlo alle dimensioni dell'universo osservabile, in questa scala un oggetto di grandezza pari alla lunghezza di Planck acquisterebbe le dimensioni del punto prima dell'ingrandimento.

Nel precedente Confine, ho raggiunto un punto dove non potevo più suddividere ulteriormente la materia; ora, ho trovato un punto dove non posso più dividere lo spazio. Ciò sembra assurdo: che cosa mi impedisce di parlare del punto situato a metà strada fra i due punti che rappresentano le estremità della lunghezza di Planck? Dal punto di vista matematico avrebbe certo senso, ma da quello fisico sembra di no. La fisica mi dice che non posso distinguere nessuno di questi tre punti.

Ciò implica che lo spazio, su questa scala, appare come qualcosa di frammentario, granuloso e discreto, non continuo come riteneva Newton. In questa prospettiva, lo spazio sembra digitale, non analogico. E questo, a sua volta, implica che i frattali del Primo Confine non possono avere una realtà fisica nel mondo quantistico; un frattale, infatti, dovrebbe avere un'infinita complessità su ogni scala, ma la fisica quantistica ci impedisce di zoomare oltre la lunghezza di Planck. I frattali del Primo Confine, quindi, esistono solo nella mia mente matematica? Pare che la fisica quantistica e la teoria del caos siano tra loro incompatibili. È possibile che la fisica quantistica abbia l'effetto di sopprimere i sistemi caotici.

Bisognerebbe dire che questa impossibilità di spingersi oltre la lunghezza di Planck è legata all'attuale teoria. È su questa scala che la fisica quantistica e la relatività generale perdono colpi. Dobbiamo sviluppare una nuova teoria, e da qui è nato tutto il lavoro in campi come la gravità quantistica e la teoria delle stringhe. Nel quadro di quest'ultima, per esempio, le particelle non sono più punti ma vanno pensate come corde di

una lunghezza finita (dell'ordine della lunghezza di Planck) che vibrano a frequenze differenti a seconda del loro tipo. C'è qualche regola applicabile a questa scala che implichi la possibilità di estrarre informazioni su scale ancora più ridotte?

L'osservazione è creazione

Ci sono stati numerosi tentativi di spiegare il principio di indeterminazione come una conseguenza dell'influenza che l'atto di osservazione esercita sul sistema. Se volete vedere dove si trova una particella, dovete spararle contro un fotone, che la urterà dandole una quantità di moto sconosciuta. Guardatevi da queste spiegazioni: suonano bene, ma sono fuorvianti. Sopra, descrivendo il passaggio di un elettrone attraverso una singola feritoia, abbiamo visto che non occorre sparare nessun fotone per alterare la quantità di moto dell'elettrone: è il semplice passaggio dell'elettrone attraverso lo schermo a fornirmi una nuova conoscenza della sua posizione, pagata con una perdita nella conoscenza della sua quantità di moto. Non c'è nessuna interazione diretta che vada a deviare la particella in una direzione o nell'altra.

A quanto pare, questa fuorviante descrizione dei fotoni che urtano la particella risale all'articolo originale di Heisenberg, che dovette includerla per superare lo scetticismo dei curatori della rivista e convincerli a pubblicare il suo lavoro.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg mette di fatto in discussione il senso del dire che un elettrone abbia simultaneamente una posizione e una quantità di moto determinate. Devo evitare di fare affermazioni come «conoscere la posizione e la quantità di moto di una particella», in quanto sono prive di contenuto empirico.

Forse il principio di indeterminazione non è soltanto un'espressione di ciò che non possiamo conoscere, ma rappresenta piuttosto un limite della definizione di un concetto. Questo aspetto è collegato alla descrizione di un elettrone attraverso una funzione d'onda, che mette in discussione il fatto che un elettrone abbia realmente una

posizione prima di essere osservato. L'approccio di Heisenberg a questo enigma relativo a ciò che costituisce la realtà era il seguente:

> Credo che l'emergere del «cammino» classico di una particella si possa esprimere in modo proficuo in questi termini: il «cammino» viene a esistere soltanto perché noi lo osserviamo.

C'è una domanda fondamentale riguardo a ciò che il principio di indeterminazione ci dice. Siamo noi che non possiamo mai conoscere la precisa posizione e la quantità di moto di un elettrone in un qualunque istante? O non è, piuttosto, che queste cose non esistono? Non è che non le possiamo conoscere, ma è che non ha senso definire queste cose per l'elettrone. L'osservazione è creazione.

Per un certo tempo, ho trovato molto difficile credere che delle proprietà fondamentali come la posizione e la quantità di moto vengano a esistere solo quando sono misurate. La quantità di moto di un elettrone potrebbe cambiare dopo che quest'ultimo ha attraversato la stretta feritoia, ma dovrà pur avere un qualche valore preciso anche prima che io la misuri, no? Posso accettare il fatto che non sono in grado di conoscere il valore della quantità di moto finché non uso i miei strumenti per determinarlo, ma ci sono un sacco di cose che non conosco prima di misurarle. La fisica quantistica, tuttavia, sta cercando di dirmi che questa fede nell'esistenza di un valore preciso prima della misurazione è un errore. È la mia interazione con il sistema a creare le proprietà della particella. Ma è davvero possibile che sia il mio atto di misurazione a produrre la realtà di questa particella?

Sono in buona compagnia. Einstein è stato tra quanti hanno cercato di mettere in discussione l'idea che delle cose come la quantità di moto e la posizione siano in realtà indeterminate finché non vengono osservate. Esse, affermava, devono senza dubbio avere dei valori espliciti mentre la particella attraversa il vuoto. Magari noi non li conosciamo, o non abbiamo degli strumenti fisici o matematici che ci consentano di calcolarli, eppure esistono, hanno un senso. La tesi, qui, è che non dovremmo confondere l'epistemologia con l'ontologia: forse non sarò in grado di calcolare allo stesso tempo sia la quantità

di moto sia la posizione (epistemologia), ma ciò non significa che queste cose non esistano (ontologia).

Ciononostante, ho dovuto abbandonare questa fede intuitiva nell'esistenza di tali cose prima della misurazione dopo aver letto dello straordinario teorema di Bell, scoperto nel 1964 dal fisico nordirlandese John Bell. Il teorema spiega perché è impossibile che certe proprietà di una particella esistano prima che avvenga una misurazione. Ogni tentativo di assumere che esistano già da prima conduce a una contraddizione. Dato che il sistema non sa in anticipo quale misurazione potreste scegliere di fare, Bell ha mostrato che è impossibile assegnare valori che tengano conto di ogni misurazione che potrebbe essere fatta senza produrre risultati in contraddizione con quello che ci dicono la teoria e gli esperimenti. È come tentare di risolvere un Sudoku che contenga un errore: per quanto vi possiate impegnare ad assegnare dei valori a ogni casella, ci saranno sempre una fila o una colonna dove lo stesso numero comparirà due volte.

Dato che il teorema di Bell è matematicamente solido, ho dovuto infine ammettere che il mio atto di misurazione sembra davvero creare le proprietà della mia particella. Nutro tuttavia ancora profondi dubbi sul fatto che l'esito dell'atto di misurazione sia davvero casuale come l'attuale teoria vorrebbe farci credere.

Una macchina nascosta

Il teorema di Bell significa che devo ingoiare il rospo e ammettere che il dado quantistico non viene lanciato fino al momento dell'osservazione; è la misurazione a far sì che il dado si fermi e decida come cadere. Ma davvero il risultato è casuale, come suggerisce la fisica quantistica? Per quanto riguarda il mio dado da casinò, so che non c'è una vera e propria casualità ma che, in ultima analisi, l'esito del lancio dipende da un meccanismo fisico. Ho l'impressione che lo stesso debba valere anche per il mio barattolo di uranio e le sue radiazioni.

Devo riconoscere la mia sensazione che la fisica quantistica sia soltanto un ripiego temporaneo adottato mentre cerchiamo una comprensione più completa del comportamento delle particelle fondamentali. Deve senz'altro esserci, come nel caso del dado, un qualche meccanismo che decide quando il mio pezzo di uranio sta per emettere una particella alfa, o che è in grado di dirci quale punto della lastra del rilevatore verrà colpito dall'elettrone dopo il suo passaggio attraverso la doppia feritoia.

Einstein, di fatto, la pensava in questo modo. Per citare le sue celebri parole:

> La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci porta più vicini al segreto del Grande Vecchio. In ogni caso, sono convinto che Lui non gioca a dadi.

Einstein riteneva che ci dovesse essere una qualche realtà oggettiva dietro questo velo che sembriamo incapaci di penetrare, qualche ingranaggio più piccolo e a noi inaccessibile da cui dipendevano gli esiti della misurazione.

Anche in questo caso, concordo con Einstein: deve per forza esserci un qualche meccanismo interno (anche se ancora non lo conosciamo) che interagisce con lo strumento di misurazione per determinare il risultato. Posso anche concedere che tale meccanismo produrrà esiti che seguono un modello di casualità, come avviene con il lancio del mio dado; tuttavia, dev'esserci qualcosa che determina il risultato. Forse le particelle all'interno del mio barattolo di uranio hanno una sorta di piccolo orologio interno tale per cui, per esempio, se la lancetta dei secondi si trova fra 0 e 30 quando faccio la misurazione, l'uranio emette una radiazione, mentre se è fra 30 e 60 non verrà rilevata nessuna radiazione.

Se questo orologio interno esiste, deve trattarsi – come spiegherò – di un meccanismo straordinario, che va contro un'altra intuizione. Questo ipotetico meccanismo dovrebbe trovarsi, penso, in prossimità del barattolo di uranio: potrebbe essere interno alle particelle dell'uranio stesso, e forse così piccolo da restare inosservabile. Il problema è che uno scenario ipotizzato per la prima volta da Einstein e dai colleghi Boris Podolsky e Nathan Rosen ha mostrato che, se un tale

meccanismo esistesse, una sua parte potrebbe anche trovarsi all'altro capo dell'universo, lontanissima dal mio barattolo di uranio. Le cose potranno anche stare così, ma è comunque bizzarro che, se ci fosse una sorta di orologio nascosto che decide quando l'uranio deve emettere una particella alfa, questo meccanismo possa estendersi per l'intero universo.

Lo scenario ipotizzato da Einstein, Podolsky e Rosen fa leva sul concetto di *entanglement* («intreccio», qui nel senso di «correlazione») quantistico. È possibile creare due particelle le cui proprietà siano tra loro correlate, nel senso che, misurando le proprietà dell'una, le risposte ottenute devono essere rispecchiate dall'altra. È un po' come avere due dadi tali che, ogni volta che uno cade sul 6, lo stesso accada all'altro. Sarebbe molto difficile creare una coppia di dadi così correlati, in quanto il meccanismo che determina come cadrà un dado è controllato dalla sua interazione con l'ambiente locale, e non si vede in che modo potrebbe controllare il comportamento dell'altro dado. Tuttavia, nella fisica quantistica è del tutto possibile creare particelle così correlate e dipendenti l'una dall'altra; esse, però, rivelano le stranissime proprietà di qualunque meccanismo nascosto che potrebbe determinare il loro comportamento al momento della misurazione.

Per dimostrare la bizzarra natura non locale di un tale meccanismo (se pure esiste), l'esperimento mentale manda i due dadi quantistici fra loro correlati ai capi opposti dell'universo. A questo punto, se misuro il primo dado quantistico, esso deve decidere che faccia mostrare, il che determina istantaneamente quale faccia sta mostrando l'altro dado al capo opposto dell'universo. Alcuni, tra cui Einstein, trovavano molto difficile accettare questa azione «fantasma» a distanza. Lui, in particolare, credeva potesse esserci un modo per programmare l'esito del lancio del dado prima che le particelle finissero ai capi opposti dell'universo; ma questo era prima che Bell dimostrasse il suo teorema, secondo cui proprio è impossibile prestabilire le proprietà di una particella quantistica prima della misurazione. Come ricorderete, la misurazione è creazione.

La vera sfida sta nel comprendere come una creazione che avviene a un capo dell'universo possa istantaneamente

produrre un nuovo stato nella seconda particella, che si trova al capo opposto. Infatti, se nel determinare l'esito della seconda particella entra in gioco un qualche meccanismo interno, quest'ultimo è appena stato alterato da qualcosa accaduto all'altro capo dell'universo. La localizzazione è quindi impossibile: il meccanismo non può essere rinchiuso in modo chiaro e ben definito dentro i confini della particella.

Einstein aveva già espresso i suoi timori riguardo a questa «azione fantasma a distanza» a proposito dell'esperimento della doppia feritoia. Come fa la lastra fotografica a sapere che non deve registrare un elettrone in una posizione se esso dev'essere rilevato in una seconda posizione? Sembra che ci sia un collasso istantaneo della funzione d'onda nel risultato registrato da un capo all'altro della lastra, senza effetto a cascata dal punto d'osservazione.

In questo nuovo caso le particelle sono due ma, essendo in un certo senso correlate, vengono descritte da una singola funzione d'onda; ciò le rende non dissimili dalla particella rilevata nell'esperimento della doppia feritoia. Le due particelle vanno considerate come un'unità olistica. Il teorema di Bell significa che le proprietà delle particelle non possono essere programmate prima che inizino il loro viaggio ai confini dell'universo; e ciò, a sua volta, implica che qualunque meccanismo determini le loro proprietà non può essere localizzato all'interno della particella ma dev'essere diffuso attraverso l'intera estensione dell'universo.

Così, se c'è un meccanismo che decide quando il mio uranio emette una radiazione (come vorrebbe la mia anima deterministica), dovrà estendersi per l'intero universo. Non può trattarsi soltanto di una macchina situata all'interno del mucchietto di uranio, dato che essa viene anche potenzialmente a controllare lo stato delle particelle, collocate in qualunque punto dell'universo, potenzialmente correlate con il mio uranio.

Spesso questi risultati vengono tirati in ballo per bloccare qualunque tentativo di sostenere che c'è un meccanismo che controlla quando il mio barattolo di uranio deve emettere una particella alfa; in realtà, però, essi andrebbero interpretati solo

come le condizioni che una macchina nascosta deve soddisfare. Un meccanismo nascosto può anche esistere: però dev'essere qualcosa di molto strano. Come disse Bell, responsabile di aver comprovato che una simile macchina nascosta dovrebbe estendersi attraverso l'intero universo: «Ciò che viene dimostrato con le prove per assurdo è una mancanza di immaginazione».

Ci sono però numerose persone che non condividono il mio desiderio di eliminare la possibilità che il comportamento dell'uranio sia casuale, perché potrebbe essere proprio questa piccola crepa nel conoscibile a permettere l'ingresso nel quadro scientifico di una cosa a cui molti tengono tantissimo: il libero arbitrio.

Alcuni commentatori hanno sostenuto che se nella fisica quantistica c'è un'autentica casualità, e lo stato presente delle cose non è quindi predeterminato dagli eventi passati, questa è una prova del fatto che nell'universo operi il libero arbitrio. Queste particelle quantistiche sembrano libere di andare da una parte o dall'altra quando decidono che cosa rivelare di sé al momento dell'osservazione. Magari quegli esseri macroscopici che sono gli uomini non avranno il libero arbitrio, ma queste microscopiche particelle sembrano poter fare ciò che vogliono… almeno entro certi limiti.

Forse il libero arbitrio di queste particelle è l'espressione di un libero arbitrio più grande. Alcuni pensatori religiosi affermano che l'ignoto conosciuto come tale dalla fisica quantistica lascia lo spazio perché un agente esterno possa agire nel mondo e influenzare il corso degli eventi. Al momento, non abbiamo nessun meccanismo per determinare il risultato della misurazione di un sistema in uno stato quantistico di sovrapposizione. A patto che, sul lungo periodo, gli esiti siano mediamente in linea con quei margini di casualità che ci aspetteremmo, sembra che ci sia spazio perché un agente possa determinare i singoli risultati. Ciò sfrutterebbe la nostra attuale incapacità di spiegare come il mondo macroscopico della misurazione interagisce con il mondo quantistico. Così, l'ignoto della fisica quantistica è la casa di un Dio teistico? Per avere qualche chance di capire se nelle equazioni della fisica quantistica potrebbe nascondersi un Dio,

dovevo parlare con qualcuno che fosse a suo agio tanto in una cattedrale quanto in un laboratorio; così, ho deciso di fare una gita a Cambridge.

Il macellaio vegetariano

John Polkinghorne ha studiato la fisica sotto la guida di Paul Dirac a Cambridge e quindi di Richard Feynman e Murray Gell-Mann al Caltech, i migliori insegnanti possibili. Fra le altre cose, le sue ricerche hanno contribuito a confermare l'esistenza dei quark, ritenuti da molti il livello più profondo nella struttura della materia.

Polkinghorne è tornato alla sua *alma mater*, così che ho potuto incontrarlo a casa sua a Cambridge. Avendo fatto per cinque anni il ricercatore a Cambridge, mi fa piacere avere l'occasione di visitarla, anche se il mio cuore resta legato alla città di Oxford. La decisione di Polkinghorne di farsi prete dopo aver dedicato più di un quarto di secolo agli studi nei campi più avanzati della fisica quantistica lo rende il candidato perfetto per esplorare il rapporto fra la teologia e l'inconoscibile quantistico. A molti la sua scelta è sembrata un drastico cambiamento di carriera, ma lui la spiega in questi termini: «Non ho lasciato la scienza perché ne sono rimasto deluso, ma perché sentivo, dopo venticinque anni di lavoro, di aver fatto la mia parte. Io ero perlopiù sul versante matematico, dove, probabilmente, uno dà il meglio di sé prima di raggiungere i quarantacinque anni».

Ohimè, odio quando la gente lo dice. Sono sempre rimasto aggrappato alla speranza che la matematica non sia una sorta di villaggio turistico per i giovani, che sia solo un mito quello che la vede come un'attività riservata agli under quaranta. Immagino però che, se lo dico, è perché ormai mi ritrovo dal lato sbagliato dello spartiacque. L'importante, comunque, è che ci siano ancora interrogativi inevasi con cui confrontarmi, ed è quello che mi spinge ad andare avanti: io ho ancora un sacco di questi interrogativi sulla mia scrivania. Posso però comprendere il desiderio di nuove sfide… come i miei attuali

sforzi di comprendere la fisica quantistica. Per Polkinghorne, la nuova sfida è stata quella dell'ordinazione, e spesso scherza sull'apparente contraddizione fra le due professioni a cui ha dedicato la sua vita.

«A volte la gente pensa che sia strano, se non addirittura ipocrita, che una stessa persona sia un fisico e anche un prete. È una cosa che suscita in loro una forte perplessità, la stessa che si avrebbe di fronte a qualcuno che dichiarasse di essere un macellaio vegetariano.»

Lui, però, ritiene che questi due ruoli siano in un rapporto di armoniosa combinazione.

«La ragione fondamentale è, semplicemente, che la scienza e la teologia si occupano entrambe della ricerca della verità.»

Gli chiedo se, a parer suo, ci siano domande che vanno oltre la portata di una delle due discipline.

«Ci sono due tipi di domande a cui la scienza non può rispondere. Alcune di esse emergono dalla scienza stessa. La prima è qualcosa che abbiamo imparato dalla fisica quantistica, ossia che il mondo, per quanto sia ordinato, ha anche un carattere nebuloso e irregolare: noi non abbiamo accesso a quel mondo post newtoniano chiaro e indubitabile che sembra esserci là fuori.

«Ma ci sono anche domande che, per la loro stessa natura, esulano dal campo della scienza. Penso che quest'ultima abbia registrato enormi successi e nutro nei suoi confronti un grandissimo rispetto, ma questi successi li ha ottenuti limitando le proprie ambizioni. In sostanza, la scienza si pone una singola domanda su come avvengono le cose: qual è il processo del mondo? Ed esclude deliberatamente, per sua natura, le domande sul significato, il valore e lo scopo.»

Non è la prima volta che mi imbatto in questo presunto spartiacque: la scienza si interessa del «come» e la religione del «perché». È una prospettiva affascinante, ma penso che sia un modo fondamentalmente sbagliato di vedere la scienza.

La scienza, di fatto, si occupa di un sacco di domande sul «perché». Perché il mio barattolo di uranio emette particelle

alfa? Perché i pianeti orbitano attorno al Sole muovendosi sullo stesso piano bidimensionale anziché ad angoli arbitrari gli uni rispetto agli altri? Perché le api costruiscono i loro alveari in strutture esagonali? Perché la popolazione dei lemming subisce un crollo ogni quattro anni? Perché il cielo è blu? Perché le cose non possono viaggiare più veloci della luce?

Polkinghorne cerca di spiegarmi la differenza che vede in questi due approcci.

«Per fare il mio esempio domestico preferito, è come quando lei entra nella mia cucina e vede che l'acqua sta bollendo. Se mi metto il cappello da scienziato, le spiego che sta bollendo perché la fiamma del gas la riscalda eccetera. Poi, però, posso anche togliermi il cappello da scienziato e dire che sta bollendo perché volevo una tazza di tè. A proposito, ne prende una anche lei?»

Decido di accettare la sua offerta. Mentre aspettiamo che sia pronto, Polkinghorne prosegue.

«Non sono costretto a scegliere una di queste due risposte. Anzi, se voglio comprendere pienamente il fenomeno dell'acqua che bolle, devo rispondere a entrambe le domande: come avviene questo processo e perché avviene.»

Sono d'accordo con Polkinghorne, almeno fino a un certo punto, nel ritenere che la scienza abbia limitato le proprie ambizioni e si sia occupata delle domande più facili. L'ultimo teorema di Fermat, in effetti, è più facile che cercare di capire il comportamento del mio gatto o la prossima mossa che farà Polkinghorne. Ciò però non significa che la scienza non possa sperare di arrivare infine a comprendere le complessità di un gatto o le bizzarrie delle aspirazioni umane.

Dal mio punto di vista, il dibattito scienza versus religione nasce dal nostro terribile desiderio di dividere tutto in compartimenti stagni; è quella mentalità che ci fa dire: «Questa è scienza, questa è teologia, questa è arte e questa è psicologia». La cosa eccitante è che abbiamo sviluppato una molteplicità di discorsi con cui affrontare il nostro ambiente. L'evoluzione di tutto quello che c'è nell'universo (inclusa la

decisione di Polkinghorne di far bollire l'acqua) potrebbe essere riducibile alle soluzioni dell'equazione d'onda di Schrödinger; ma per quanto questo linguaggio sia eccellente nel descrivere il comportamento del mio barattolo di uranio, non è quello giusto per spiegare la migrazione di uno stormo di uccelli, per esprimere il brivido che avverto nell'ascoltare Mozart o per discutere l'immoralità della tortura.

Polkinghorne concorda sui pericoli di una visione troppo riduzionista della realtà: «A volte, quando discuto con qualche amico che, da riduzionista convinto, sostiene che la fisica è tutto, gli chiedo per prima cosa: "E per quanto riguarda la matematica?" e per seconda: "E che cosa dobbiamo dire della musica?". Certo, la musica è costituita soltanto da vibrazioni dell'orecchio, ma detto questo abbiamo detto tutto quello che la scienza può affermare riguardo alla musica; ciò, però, non significa affatto che abbiamo detto tutto quello che si può dire sulla musica. Mi sembra che sia molto importante evitare di usare su ogni cosa l'accetta riduzionista».

Riporto Polkinghorne al suo primo esempio di una domanda a cui la scienza non può rispondere. È realmente convinto che la fisica quantistica ci dica che non possiamo sapere quando il mio barattolo di uranio emetterà la sua prossima particella? È davvero soltanto una questione di caso?

«È sgradevole che ci sia questa sorta di lotteria. Un casinò, in pratica. La maggior parte dei fisici quantistici che sono impegnati a fare i calcoli ci si sono abituati, ma io penso che sia qualcosa di insoddisfacente. La domanda è se si tratta di una questione epistemica oppure ontologica.

«I problemi epistemologici hanno una risposta, anche se per ora non la conosciamo; quelli ontologici, invece, sono situazioni in cui non possiamo sapere. E questa è proprio l'interpretazione tradizionale della teoria quantistica: non possiamo sapere.

«Nel caso di un casinò, sappiamo di essere davanti a un problema sostanzialmente epistemico. Ci sono microscopici effetti che influenzano le cose. La mia sensazione è che se i problemi della teoria quantistica sono epistemici, dovremmo farci qualche idea su come emerge quella frustrazione

epistemologica, che cos'è che ci blocca. Ritengo che sia ragionevole tentare di indagare la questione sul piano ontologico, spingendoci il più avanti possibile. Per ora non ci siamo ancora arrivati.»

L'approccio più diffuso ai problemi della fisica quantistica sostiene che prima che osserviamo una particella, quest'ultima si trova in una sovrapposizione di stati descritta dalla funzione d'onda, e che l'osservazione tramite un apparato macroscopico provoca un salto nel suo comportamento: la particella viene ad avere un singolo stato e la funzione d'onda codifica la probabilità di ritrovarla in un particolare stato piuttosto che in un altro. Non c'è nessun tentativo di spiegare questo salto. Questa è la cosiddetta interpretazione di Copenaghen (così chiamata in onore della città del suo principale fautore, il fisico Niels Bohr). In sostanza, è la scuola del: «Chiudete il becco e fate i calcoli».

«Pur sottoscrivendo l'interpretazione di Copenaghen della teoria quantistica, non la ritengo una soluzione soddisfacente dal punto di vista intellettuale. Alla fine, tutto si riduce a dire "e poi succede così".

«In qualche modo, il salto è prodotto dall'intervento di un apparato di misurazione macroscopico. Fine della discussione. Ma questo significa accontentarsi di una definizione. È un problema. Ci sono ancora degli enigmi.»

Dato che Polkinghorne crede nell'esistenza di un Dio che agisce nel mondo, mi chiedo se ritenga che l'ignoto rappresentato da questo collasso della funzione d'onda sia una finestra attraverso la quale il suo Dio può intervenire.

«Non penso che Dio sia impegnato a decidere se il nucleo del suo uranio deve decadere. C'è qualche sorta di meccanismo… no, "meccanismo" non è la parola giusta… qualche sorta di influenza che regola questa cosa. Uno dei paradossi della teoria quantistica è che noi siamo qui, ottant'anni dopo la sua formulazione, e non siamo ancora riusciti a comprenderla.»

Nel Primo Confine, esplorando la teoria del caos, ho richiamato la tesi di Polkinghorne secondo la quale Dio poteva

avere a che fare con i decimali che non possiamo conoscere. Gli chiedo ora perché ha scelto la teoria del caos e non la fisica quantistica – il suo campo di studi – come l'ignoto attraverso il quale il suo Dio potrebbe agire.

«C'è stato un periodo di una decina d'anni in cui la comunità scientifica e quella teologica sono state alle prese con queste forme di possibile intervento. Com'è ovvio, non hanno risolto il problema, trattandosi di un progetto a dir poco assai ambizioso. Molte persone, soprattutto sulla costa occidentale dell'America, scommettevano che la teoria quantistica avrebbe spiegato tutto. Il che mi sembrava un po' esagerato. Per controbilanciare il discorso, ho finito per sbandare un po' troppo nell'altra direzione. Non penso che la teoria del caos sia la soluzione universale. In realtà, si limita a indicarci che l'universo fisico, per quanto ordinato, ha un ordine meno rigido di quanto pensasse Newton.»

Di certo, però, Polkinghorne non sottovaluta le implicazioni della fisica quantistica.

«La scoperta dell'imprevedibilità intrinseca nella teoria quantistica ci mostra indubbiamente che il mondo non è meccanico e che, di conseguenza, noi non siamo certo degli automi in un qualche senso triviale e inconcepibile di questo termine.»

È interessante notare come un agente divino che cerchi di dettare il corso del futuro sfruttando l'ignoto della fisica quantistica abbia l'opportunità di intervenire soltanto quando la misurazione viene fatta: finché quest'ultima non provoca un cambiamento di fase, infatti, le equazioni della fisica quantistica sono del tutto deterministiche e procedono in un modo lineare, non caotico, che non lascia spazio ad alcun intervento di un agente. Questo è uno dei motivi per cui i fisici religiosi come Polkinghorne, che tentano di trovare un varco che permetta a un agente divino di intervenire, non sono particolarmente appassionati dell'inconoscibile implicato dalla fisica quantistica.

Mentre torno a casa da Cambridge, la questione del rapporto fra epistemologia e ontologia mi sembra centrale per capire che cosa mi dice la fisica quantistica riguardo a quello che non

posso conoscere. È come per il mio dado da casinò? Anche se non possiamo conoscere le precise condizioni di partenza del lancio del dado, non dubitiamo della loro esistenza. La fisica quantistica, però, mette in discussione la mia possibilità di dire che il mio barattolo di uranio abbia uno stato iniziale ben definito.

Oggi l'interpretazione più diffusa nel campo della fisica è che ci sbagliamo a credere che le particelle all'interno del mio uranio abbiano simultaneamente una posizione e una quantità di moto precise. Questa interpretazione trasforma l'epistemologia in ontologia: la nostra incapacità di conoscere è di fatto un'espressione della vera natura delle cose. Per citare le parole di Heisenberg: «Gli atomi e le stesse particelle elementari non sono reali; formano un mondo di possibilità e di potenzialità piuttosto che un mondo di cose o di fatti».

Qualcosa che esce dal nulla

Anche se il principio di indeterminazione di Heisenberg sembra creare un ignoto o un varco attraverso il quale Dio può intervenire nel mondo, esso potrebbe di fatto anche venire a riempire un altro buco nella nostra conoscenza che spinge molte persone a credere in un Creatore. Uno dei più grandi ignoti è infatti questo: perché c'è qualcosa anziché nulla? Il mio barattolo di uranio mi è arrivato via posta, spedito attraverso Amazon da Images Scientific Instruments di Staten Island. Se però cerco di risalire alla sua origine ultima, sono destinato a scontrarmi infine con qualcosa di ignoto. Il bisogno di trovare una qualche spiegazione di questo ignoto è al cuore dei concetti di Dio emersi in numerose culture: Dio, cioè, viene visto come la risposta ultima a quella domanda. Ma di quale risposta si tratta? Forse non fa altro che evidenziare il fatto che molte persone pensano che non possiamo conoscere tale risposta.

Ritengo che la maggior parte degli scienziati che parlano di un Dio abbiano in mente qualcosa che risponda alla domanda, apparentemente senza soluzione, sull'origine di tutte le cose.

Una volta che l'universo c'è e funziona secondo le proprie leggi, sono più che felici di mettere al lavoro le loro menti scientifiche per comprendere come si comportano le cose che abbiamo davanti, senza aspettarsi che Dio intervenga nel mondo. Questo è ciò che viene spesso chiamato deismo più che teismo; questa sorta di Dio può essere considerato come perlopiù equivalente alle cose che non conosciamo.

Certo, se tentiamo di trovare il senso effettivo di questa risposta, ci imbattiamo nel problema del regresso all'infinito: se pensate che qualcosa sia responsabile della creazione dell'universo, sorge subito la domanda su chi abbia creato quel qualcosa. Com'è ovvio, quel «chi» fa parte del problema, dato che avvertiamo un irrefrenabile bisogno di personificare tale concetto.

Così, questo è il motivo per cui molti parlano di definizioni trascendenti, che non possono essere articolate: per evitare il problema del regresso all'infinito. Evitano persino di provare ad articolare che senso potrebbe avere la risposta: semplicemente, è qualcosa che ci è ignoto e trascende i nostri tentativi di conoscerlo. Questo è il concetto di Dio che stava cercando di formulare il presentatore del programma della domenica mattina sulla BBC dell'Irlanda del Nord a cui ero stato invitato.

Questo Dio viene definito come qualcosa che non può essere articolato. Ma, posto in questi termini, il suo concetto mantiene ancora una qualche potenza? Se non può interferire, influenzare, essere articolato e descritto, perché ne avremmo bisogno? Ecco perché tutti i creatori di miti hanno dovuto plasmare i loro dèi in forme che potessero essere articolate, riconosciute e spesso personificate. Un Dio troppo trascendentale perde la sua potenza e viene a svanire. In molte antiche religioni, è esattamente ciò che è accaduto all'idea del Dio Sommo o Dio del Cielo. Come ha scritto la commentatrice religiosa Karen Armstrong nel suo libro *The Case for God*: «È diventato un *Deus otiosus*, una divinità "inutile" o "superflua", ed è gradualmente sparito dalla coscienza del suo popolo».

Come ha dichiarato il teologo Herbert McCabe: «Affermare l'esistenza di Dio significa asserire che c'è una domanda

inevasa sull'universo». McCabe avverte però anche che l'errore delle religioni è stato sempre quello di trasformare questo Dio in una cosa anziché in un'idea filosofica: il problema, ritiene, è che la religione scade troppo spesso nell'idolatria, cercando di entrare in un rapporto troppo personale con questo concetto di Dio.

Il fatto è che un concetto indefinito, inconoscibile, trascendente è troppo astratto per coinvolgere gran parte delle persone: non può offrire quel genere di consolazione di cui molti sono alla ricerca. È quindi forse inevitabile che la sua potenza dipenda dal suo diventare un po' meno trascendente, qualcosa di tangibile, anche se ciò contraddice la sua definizione originale e porta al paradosso del «chi ha creato il Creatore».

Zero è uguale a uno meno uno

Eppure, la questione del perché c'è qualcosa anziché nulla potrebbe non essere così inconoscibile come pensiamo; e, forse, può essere proprio l'inconoscibile di questo Terzo Confine a fornirci un modo per ottenere qualcosa *ex nihilo*, per far sì che dal nulla esca qualcosa. Non appena avete un po' di spazio vuoto, la fisica quantistica inizierà a riempirlo di materia. La versione del principio di indeterminazione di Heisenberg su cui ci siamo soffermati fin qui prende in considerazione il rapporto tra posizione e quantità di moto, ma ci sono altri concetti fisici tra i quali sussiste un'analoga correlazione.

Per esempio, il principio di indeterminazione collega la misurazione dell'energia e il tempo: se guardo ciò che sta accadendo in una porzione di spazio apparentemente vuota, riducendo il periodo di tempo in cui esamino lo spazio ottengo un incremento dell'indeterminazione del suo contenuto energetico, cioè lo spazio vuoto non può mai essere davvero vuoto. Su periodi di tempo molto brevi, c'è la chance che si verifichino fluttuazioni energetiche; e dato che l'energia può convertirsi in massa, ciò porta alla spontanea comparsa di

particelle dal vuoto. Nella maggior parte dei casi, tali particelle si annichilano a vicenda e tornano a scomparire nel vuoto, ma a volte possono sopravvivere; e questo ci offre un meccanismo per ottenere qualcosa dal nulla.

Ma da dove proviene questa energia? La sua improvvisa comparsa non contraddice quel principio di conservazione dell'energia che la fisica ha tanto caro? Alcuni scienziati sostengono che, di fatto, il contenuto totale di energia dell'universo è sempre pari a zero e che, di conseguenza, nessuno sta imbrogliando il sistema. La chiave per capire questo concetto è che la gravità porta un contributo energetico negativo; così, l'universo può emergere dal nulla – da zero energia – perché ciò che emerge è una combinazione di energia positiva e negativa. Quella che vediamo all'opera è, semplicemente, l'equazione 0 = 1 ⁻ 1. Dove 0 è il nulla, 1 più ⁻ 1 sono la materia e la forza gravitazionale che la attrae.

Forse sembrerà un po' strano chiamare la gravità energia negativa, ma immaginate di mettere una grande massa – come un asteroide – vicino alla Terra: man mano che cade verso il pianeta, l'asteroide acquista energia cinetica, ma al contempo aumenta l'attrazione gravitazionale, che cresce con l'avvicinarsi di due masse. Così, per mantenere la conservazione dell'energia, questa energia potenziale gravitazionale è negativa e viene a controbilanciare l'incremento dell'energia cinetica.

Stando al principio di indeterminazione di Heisenberg, dal semplice fatto che lo spazio esiste consegue che avremo particelle che appariranno dal nulla. Non serve nessun creatore. Le fluttuazioni quantistiche significano che la comparsa di qualcosa dal nulla accade continuamente. Come vedremo nel Quinto Confine, è proprio facendo leva su questo principio che Hawking ha spiegato perché i buchi neri irradiano particelle. Il nulla diventa una particella e un'antiparticella: una delle due rimane intrappolata nel buco nero, mentre l'altra riesce a fuggire come radiazione. La fisica quantistica, quindi, ci offre già una parziale risposta alla domanda sul qualcosa che esce dal nulla.

Tuttavia, abbiamo perlomeno bisogno di un campo su cui giocare questa partita quantistica, così che viene a emergere la domanda sulla creazione dello spazio vuoto. Forse è qui che nasce la confusione: qualcuno pone un'equivalenza fra lo spazio vuoto e il nulla, ma si tratta di un errore. Uno spazio tridimensionale vuoto è pur sempre qualcosa: un'arena dove possiamo vedere all'opera la geometria, la matematica e la fisica. In fin dei conti, il fatto stesso di avere uno spazio vuoto tridimensionale anziché tetradimensionale indica già che siamo davanti a qualcosa: il nulla, infatti, è privo di dimensioni.

Ci sono teorie capaci di spiegare come lo spazio e il tempo potrebbero comparire allo stesso modo delle particelle, come fluttuazioni nella gravità quantistica. È come se con la matematica bastasse non inserire nulla come input per vedere come questo nulla può dare origine a qualcosa – e nientemeno che a un universo. È sorprendente come la scienza ci stia dicendo che basta davvero poco per mettere in moto le cose. Alla fine, l'origine ultima da cui proviene il mio barattolo di uranio potrebbe essere un po' di matematica, e non Amazon.

Quarto Confine: l’universo ritagliato

7

> «Io m'arrischio a insinuare questa soluzione: *la Biblioteca è illimitata e periodica*. Se un eterno viaggiatore la traversasse in una direzione qualsiasi, constaterebbe alla fine dei secoli che gli stessi volumi si ripetono nello stesso disordine (che, ripetuto, sarebbe un ordine: l'Ordine). Questa elegante speranza rallegra la mia solitudine.»
>
> JORGE LUIS BORGES, *La biblioteca di Babele*

Sono sempre stato intrigato dalla domanda se l'infinito abbia un'esistenza fisica. I miei tentativi di tagliare il dado in pezzi infinitamente piccoli si sono arenati quando sono giunto agli indivisibili quark. Sembra poi che nemmeno lo spazio possa essere diviso all'infinito, dato che potrebbe essere quantizzato. La mia domanda sull'esistenza dell'infinito dovrà quindi rivolgersi in un'altra direzione: dovrò cioè guardare fuori, non dentro.

Che cosa succede se continuo a muovermi lungo una linea retta? Posso procedere per sempre? Penso che chiunque abbia mai sollevato lo sguardo verso lo spazio si sarà senz'altro posto questa domanda almeno una volta nella sua vita. Se lancio il mio dado nel vuoto siderale, un giorno finirà per ritornare al punto di partenza? O, magari, colpirà un muro cosmico e rimbalzerà indietro? O, ancora, procederà per sempre nella sua direzione? Chiedersi se l'universo si estenda all'infinito significa porsi una domanda sorprendentemente sottile, che viene a collegarsi al fatto che lo spazio stesso non è statico. Anche se l'universo fosse infinito, in teoria potrei essere vincolato all'estensione di spazio da me esplorabile. Forse è una cosa che non potrò mai sapere.

Per aiutarmi nel mio viaggio verso l'infinito, ho costruito un globo stellare incollando insieme le mappe dell'universo (o almeno della sua parte osservabile) che ho scaricato dal sito web dell'Agenzia spaziale europea. In realtà, non si tratta esattamente di un globo: è fatto di due fogli formato A4 che ho ritagliato e incollato in modo da creare una delle mie figure matematiche preferite: un icosaedro, il solido formato da venti triangoli equilateri. Come il mio dado da casinò, è uno dei cinque solidi platonici, tutti adatti a essere usati come dadi per via della loro regolarità.

Se osservo il cielo in una notte serena, sembra che le stelle siano tutte dipinte su un immenso globo celeste nero che racchiude l'universo. Di fatto, in molte culture antiche il modello dell'universo era proprio questo: si credeva, cioè, che la Terra fosse al centro del globo che si estende attorno a un asse passante per Polaris, quella stella che pare rimanere ferma nel cielo notturno mentre tutte le altre le ruotano attorno.

Il mio globo stellare di carta è un modello che rappresenta questa sfera celeste. Ho sistemato l'icosaedro sulla mia scrivania, con la stella polare rivolta verso l'alto. Verso la metà della figura ci sono i segni dello zodiaco, che marcano il passaggio dell'anno (incluso il mio, la costellazione della Vergine); il Sole sembra muoversi attraverso ognuna di queste costellazioni, impiegando un anno per tornare al suo punto di partenza. Sul fondo della figura ci sono le stelle visibili dall'emisfero australe, la più luminosa delle quali è Alpha Centauri che in realtà è formata da tre stelle (tra cui Proxima Centauri, la più vicina al nostro Sole).

Le persone da millenni costruiscono versioni del mio globo di carta. Cicerone racconta che gli antichi astronomi greci creavano modelli di questo globo celeste su cui segnavano la posizione delle stelle, lontani precursori del mio universo ritagliato. Purtroppo, nessuno di questi modelli greci è giunto fino a noi, così che sono dovuto passare in uno dei miei musei preferiti di Oxford, il Museo della storia della scienza, per vederne altri giunti fino a noi. C'era uno splendido globo, alto circa mezzo metro, risalente agli inizi del Cinquecento; costruito in Germania, dà vita alle costellazioni

rappresentandole con immagini di uccelli, pesci, animali e uomini stampate su spicchi di carta incollati sulla sfera.

Anche se il mio moderno globo ritagliato non può eguagliare la bellezza di quello cinquecentesco conservato nel museo, il suo design icosaedrico si richiama a Platone e alla sua teoria secondo cui, di fatto, il globo celeste che racchiude il nostro universo potrebbe non essere una sfera bensì un dodecaedro (un altro dei cinque solidi platonici adatti a essere usati come dadi). Ora, dire che questo dado matematico è importante per comprendere la forma dell'universo potrebbe non essere la forzatura che sembra.

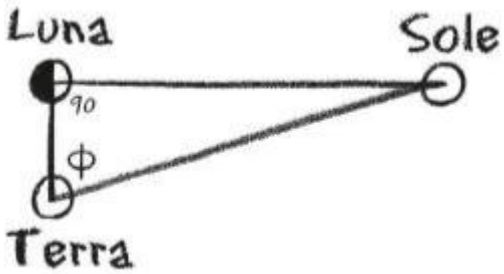
Telescopi triangolari

La nostra possibilità di conoscere qualcosa su regioni dello spazio che non visiteremo mai è straordinaria. Ogni cultura ha sollevato lo sguardo verso il cielo notturno, contemplando quanto c'è là fuori. Gli oggetti che balzano subito all'occhio sono il Sole e la Luna. Ma come hanno fatto le antiche culture, confinate sulla superficie del nostro pianeta, a scoprire qualcosa su questi corpi celesti? Penso che questo sia uno degli aspetti più straordinari della matematica: ci consente di dedurre informazioni sull'universo senza abbandonare la comodità dei nostri osservatori.

La trigonometria – la matematica di angoli e triangoli – è stata sviluppata non come uno strumento per torturare gli studenti, bensì come mezzo per orientarsi nel cielo notturno. È la più antica forma di telescopio. Già nel III secolo a.C., Aristarco di Samo fu in grado di calcolare le dimensioni del Sole e della Luna in termini di raggi terrestri e di determinare la loro distanza relativa dalla Terra solo grazie a un triangolo matematico.

Per esempio, quando la Luna è esattamente in quadratura (ossia, quando è illuminata per metà), l'angolo fra la Terra, la Luna e il Sole è di 90 gradi; pertanto, misurando l'angolo Φ tra la Luna, la Terra e il Sole, posso usare la trigonometria per calcolare la distanza dalla Terra alla Luna in relazione a quella

dalla Terra al Sole. Il rapporto fra queste due distanze è ciò che viene espresso dal coseno dell'angolo Φ, ed è qualcosa che posso determinare attraverso un'analisi puramente matematica.



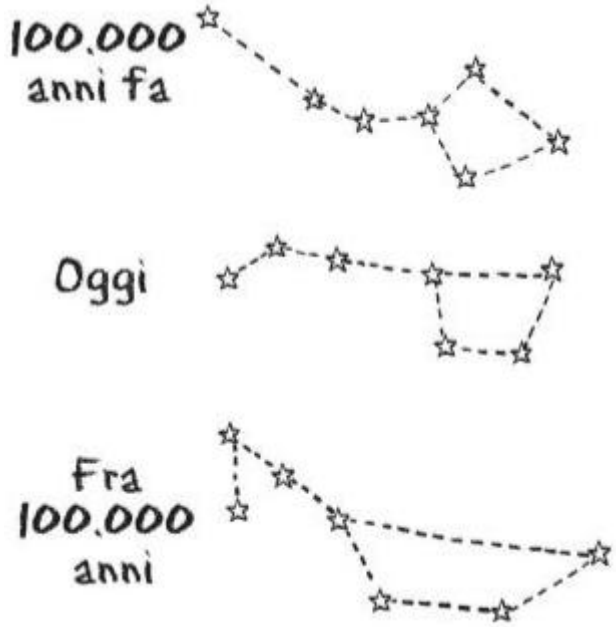
Il triangolo rettangolo formato dalla Terra, dalla Luna e dal Sole quando la Luna è in quadratura.

La scarsa accuratezza della misurazione, tuttavia, portò Aristarco a sbagliare di un fattore di 20 nella determinazione della distanza relativa: aveva stimato che l'angolo Φ fosse di 87 gradi, mentre in realtà misura 89,853 gradi (è quasi un angolo retto). Una piccola discrepanza in angoli di questa grandezza porta a enormi differenze nelle lunghezze relative dei lati del triangolo. La corretta determinazione delle dimensioni del sistema solare avrebbe richiesto l'invenzione del telescopio e lo sviluppo di strumenti matematici più ingegnosi.

Anche prima di tale invenzione, comunque, gli astronomi si resero conto che il Sole e la Luna non erano gli unici corpi celesti a muoversi. Le antiche culture individuarono nel cielo notturno diversi puntini di luce che si comportavano in modo assai diverso rispetto alla moltitudine degli altri astri: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno erano come fari vaganti di luce, corpi luminosi che non possono essere segnati sulla mia sfera celeste perché la prossima notte si troveranno altrove. Una spiegazione dell'importanza del numero sette presso numerose culture deriva proprio dal fatto che, con il Sole e la Luna, i cinque pianeti visibili erano in tutto sette corpi celesti.

Cimentarsi con l'infinito

Come i pianeti si spostano giorno dopo giorno in relazione alle stelle, così anche queste ultime vengono a muoversi le une rispetto alle altre: la sfera celeste che tengo sulla scrivania, quindi, è solo un'istantanea del cielo notturno in un particolare momento. Sulla mia sfera, per esempio, è segnata la costellazione, facilmente identificabile, del Grande Carro. Le stelle che la costituiscono – Merak, Dubhe, Alkaid, Phecda, Megrez, Alioth e Mizar – si stanno però muovendo: 100.000 anni fa la loro configurazione era molto diversa da quella di oggi, e lo stesso sarà fra 100.000 anni.



I cambiamenti nella configurazione delle stelle del Grande Carro.

Gli antichi astronomi ritenevano tuttavia che le stelle fossero fisse, legate alla sfera celeste che racchiudeva l'universo. Si parlava poco di quello che ci poteva essere al di là di tale sfera: l'oltre veniva visto come il vuoto, dove non c'era nulla. Al di là dei confini del mio modello di carta c'era un'area inaccessibile. Alcuni filosofi medievali, comunque, si interrogarono sulla natura del vuoto. Nicola d'Oresme riteneva che lo spazio extracosmico oltre la sfera celeste esistesse realmente e fosse di estensione infinita; nei suoi scritti, identificò questa immensità con Dio, muovendosi in una direzione che forse non si discosta troppo dalla mia concezione di Dio come le cose che non possiamo conoscere.

D'Oresme non si lasciava intimorire dalla sfida filosofica dell'infinito. Di fatto, dimostrò che è possibile raggiungere

l'infinito sommando le frazioni 1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + …; un risultato matematico controintuitivo, dato che gli elementi che si aggiungono sono via via più piccoli. Questa somma infinita è nota come la serie armonica, perché quando pizzico una corda del mio violoncello il suono è costituito da armoniche le cui lunghezze d'onda sono date da tutte queste frazioni. Come spiegherò in seguito, la scoperta che sommando gli elementi di questa serie armonica otteniamo l'infinito ha ripercussioni interessanti sulla questione di quanto lontano potremo mai spingere il nostro sguardo nello spazio.

A quanto pare, solo nel Quattrocento gli astronomi iniziarono a contemplare la possibilità che la sfera celeste fosse un'illusione e che l'universo si estendesse all'infinito. Nicola Cusano riteneva che l'universo fosse infinito e che, di conseguenza, qualunque punto potesse essere considerato come il suo centro. Quest'idea venne raccolta dal frate domenicano Giordano Bruno, che nel 1584 scrisse un influente saggio intitolato *De la causa, principio et uno*:

> È dunque l'universo uno, infinito, inmobile […] Non deve posser essere compreso; e però infinibile e interminabile, e per tanto infinito e interminato, e per conseguenza inmobile. (Quinto dialogo)

La logica che conduce Bruno a questa conclusione è interessante. Essendo creato da Dio, che è inconoscibile, l'universo stesso deve trascendere la nostra comprensione; di conseguenza, esso dev'essere infinito, dato che un universo finito è in teoria conoscibile. Ora, io direi che è vero l'opposto: se l'universo è infinito, significa che trascende potenzialmente la nostra comprensione. E se io sto esplorando il concetto di Dio come un modo di articolare le cose che non possiamo conoscere, un universo infinito, se inconoscibile, potrebbe implicare l'esistenza reale di questo concetto di trascendenza. Ma l'universo è davvero infinito? E, in tal caso, è realmente inconoscibile come potrebbe sembrare di primo acchito?

Per giustificare la propria visione di un universo infinito, Bruno non si appellava soltanto alla fede in Dio. Una delle più forti obiezioni all'idea di un universo finito contenuto in una sfera celeste consiste nella domanda su che cosa ci sia oltre i confini che delimitano tale universo. Molti sostenevano che non ci fosse nulla, che ci fosse il vuoto, ma Bruno non era

convinto di questa risposta. Egli riteneva inoltre che anche il tempo fosse infinito, sia nel passato sia nel futuro. Ciò eliminava, in un modo alquanto controverso, la necessità di un momento della creazione e di un giorno del giudizio finale. Bruno non temeva le dispute e i suoi insegnamenti sulla Bibbia lo posero infine in rotta di collisione con la Chiesa cattolica, il che all'epoca non era affatto una buona cosa: venne bruciato sul rogo il 17 febbraio 1600.

Le idee di Bruno sollevano l'interrogativo su se e come potremmo mai stabilire se l'universo è infinito. Se è finito, potrebbe essere possibile conoscerlo. Abbiamo scoperto che la superficie della Terra è finita e navigabile; allo stesso modo, quindi, potremo semplicemente navigare il nostro universo dimostrandone così la finitezza. Pur non disponendo di una nave su cui veleggiare fino ai confini dell'universo, gli scienziati nel Seicento hanno inventato un modo più ingegnoso di esplorare lo spazio: il telescopio.

Fino a dove possiamo vedere?

Fu la generazione di Galileo a scoprire che è possibile aumentare la portata della propria vista sistemando lenti di vetro ricurve dentro un tubo. Di fatto, anche se l'invenzione del telescopio è stata accreditata per anni allo stesso Galileo, il merito dovrebbe andare all'ottico olandese Hans Lippershey, che presentò un brevetto per uno strumento «per vedere le cose lontane come se fossero vicine» con un fattore di ingrandimento di 3.

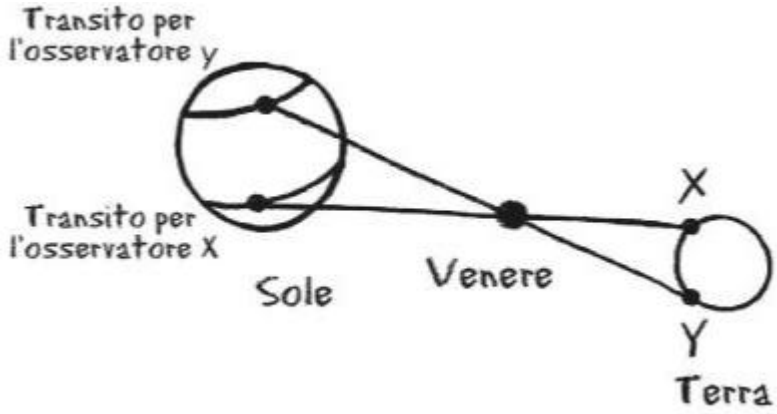
Galileo ne sentì parlare durante un viaggio a Venezia; quella notte stessa, ne dedusse il principio di funzionamento e si mise presto a costruirne degli esemplari capaci di ingrandire di 33 volte. Il nome «telescopio» (dal greco *tele*, «lontano» e *scopein*, «vedere») fu coniato da un poeta greco che partecipò a un banchetto in onore di Galileo nel 1611: e, in effetti, tale strumento permise allo scienziato e alle successive generazioni di astronomi di vedere più in là di quanto fosse mai stato possibile. Galileo scoprì le lune di Giove e il movimento delle

macchie solari, che implicava la rotazione del Sole sul proprio asse; fenomeni che avrebbero contribuito a confermare il modello copernicano di un sistema solare incentrato attorno al Sole.

Nel 1663, il matematico scozzese James Gregory si rese conto che il telescopio poteva essere usato anche per fare nuovi calcoli sulla distanza del Sole dalla Terra. Keplero aveva già osservato il tempo impiegato dai pianeti per compiere un'orbita attorno al Sole e, tramite le sue leggi del moto planetario, ne aveva dedotto la distanza relativa di ciascuno di essi dalla stella. La sua terza legge afferma che il quadrato del tempo impiegato da un pianeta per completare un'orbita è proporzionale al cubo della sua distanza dal Sole: per esempio, Venere completa un'orbita in 3/5 del tempo impiegato dalla Terra, il che significa che la distanza di Venere dal Sole è circa 7/10 (approssimativamente, $(3/5)^{2/3}$) di quella fra il Sole e la Terra. (Quando parliamo di distanza dal Sole occorre prestare attenzione: come scoperto dallo stesso Keplero, infatti, i pianeti non descrivono cerchi perfetti bensì delle ellissi, e la loro distanza quindi varia. In generale, con distanza si intende qualcosa come la distanza media.)

Queste, però, sono soltanto distanze relative; quello che Gregory e altri avevano invece compreso è che sarebbe stato possibile usare le osservazioni dei transiti di Venere davanti al disco solare per calcolare, con un po' di trigonometria, la distanza reale della Terra e di Venere dal Sole. Osservando da due diverse località terrestri i differenti punti e momenti in cui Venere transitava davanti al Sole, avrebbero potuto determinare l'angolo del triangolo formato dai due osservatori e da Venere; quindi, calcolando la distanza fra i due osservatori sulla Terra e usando la trigonometria, sarebbe stato possibile dedurre la distanza di Venere.

Il trucco della trigonometria è di usare i triangoli per cambiare qualcosa che non possiamo misurare direttamente (come la distanza fra la Terra e Venere) in qualcosa che possiamo misurare dalla superficie terrestre (come un angolo o la distanza tra due punti sulla Terra). Il calcolo consisteva in una complicata applicazione del pensiero matematico astratto combinato con l'osservazione astronomica pratica.



Il transito di Venere osservato da due diverse località terrestri.

Il problema è che questi transiti non si verificano tanto spesso: dal 1400, Venere era passato davanti al Sole soltanto dieci volte. All'inizio Gregory aveva proposto di usare il transito di Mercurio, in quanto il successivo passaggio di Venere sarebbe avvenuto solo nel 1761. Venuto a conoscenza del suo lavoro, Edmond Halley registrò il transito di Mercurio nel 1676, ma emerse che era stata compiuta solo un'altra osservazione: in teoria sarebbero state sufficienti per calcolare la distanza, ma dati gli errori possibili gli astronomi volevano averne il maggior numero possibile.

Furono le molteplici osservazioni dei transiti di Venere nel 1761 e nel 1769 a consentire infine il calcolo della distanza della Terra dal Sole. In uno dei primi esperimenti scientifici globali coordinati di questo genere, gli astronomi stabilirono che la Terra distava 95 milioni di miglia (circa 153 milioni di chilometri) dal Sole. Halley, morto nel 1742, non poté assistere al coronamento di quel progetto che aveva tentato di realizzare quasi novant'anni prima. In base ai calcoli odierni, la distanza media della Terra dal Sole è di 92.955.807,267 miglia (circa 149.600.000 chilometri).

Era il primo elemento da cui traspariva l'immensità contenuta nel mio globo celeste di carta. Gli antichi astronomi credevano che il mio modello contenesse globi più piccoli su cui erano incastonati i pianeti; in tal caso, questi globi avrebbero dovuto avere diametri di milioni e milioni di chilometri.

Resto sempre stupito di fronte alla capacità della trigonometria di tradurre una misurazione fatta sulla Terra in

una misurazione della distanza di quest'ultima da un pianeta su cui nessun essere umano ha mai messo piede. In seguito, la matematica avrebbe consentito successi ancora più impressionanti. I telescopi e la luce non sono gli unici mezzi per individuare ciò che potrebbe esserci là fuori. La matematica avrebbe offerto agli astronomi una lungimirante visione dell'universo, tale da permettere di predire l'esistenza di un nuovo pianeta mai inquadrato da nessun telescopio.

Scoprire un pianeta con la punta di una penna

Due sono i modi per individuare un nuovo pianeta: la fortuna e la logica. La scoperta del primo pianeta nell'epoca moderna si deve a un colpo di fortuna. Il musicista tedesco Friedrich Wilhelm Herschel si era trasferito in Inghilterra da Hannover per tentare la carriera musicale, ma era anche un astronomo dilettante e trascorreva le notti a scrutare il cielo con la sua vasta gamma di telescopi.

Il 13 marzo 1781, scorse qualcosa di insolito. Quell'oggetto dapprima scambiato per una stella sembrava cambiare dimensione a seconda del livello di ingrandimento del telescopio, come in genere avviene con i corpi celesti abbastanza vicini. Herschel controllò quindi se si muoveva e vide che, dopo quattro giorni, aveva cambiato posizione rispetto alle stelle. Dato il numero di comete individuate, non pensò subito che si trattasse di un nuovo pianeta.

Tuttavia, dopo aver avvisato l'Astronomo reale, l'oggetto venne seguito più a lungo e divenne chiaro che la sua orbita non era parabolica – come ci si aspetterebbe per una cometa – bensì quasi circolare. Il corpo celeste, inoltre, era troppo luminoso per essere una cometa, e non aveva una coda visibile; gli astronomi conclusero quindi che doveva trattarsi di un nuovo pianeta. Herschel avrebbe voluto dargli il nome di re Giorgio III, ma alla fine la mitologia classica prevalse: Saturno era il padre di Giove e questo nuovo pianeta

dall'orbita più esterna prese il nome del padre di Saturno, Urano.

Gli astronomi erano estasiati da questa scoperta e iniziarono a mappare la traiettoria, a cercare le eventuali lune e a calcolare la lunghezza della sua orbita attorno al Sole. Il comportamento di Urano, però, non sembrava in linea con le loro aspettative. La teoria della gravitazione di Newton, che aveva avuto uno straordinario successo nel determinare i percorsi degli altri pianeti, pareva incapace di predire le posizioni di questo nuovo corpo celeste. Nel 1788, Urano si trovava a 1/120 di grado dalla sua posizione calcolata, e gli scienziati capirono che occorreva tener conto degli effetti gravitazionali di Giove e Saturno.

Nel 1791 venne pubblicata una nuova traiettoria, ma nel 1800 Urano l'aveva già abbandonata. Nel 1825 era molto avanti rispetto alla sua posizione prevista, ma poi iniziò a rallentare e, nel 1832, era rimasto indietro. C'era qualche misteriosa sostanza che faceva resistenza? Le leggi della gravitazione di Newton cessavano di valere a grande distanza dal Sole? Qualcuno congetturò che potesse esserci un altro pianeta che, come Giove e Saturno, faceva sentire gli effetti della sua attrazione gravitazionale su Urano; ma, in tal caso, dov'era questo nuovo, ipotetico pianeta?

Se Urano era stato scoperto per buona sorte, questo nuovo pianeta sarebbe stato individuato usando la forza della pura logica, incarnata nella matematica di Newton. Fino a quel momento, gli astronomi erano partiti dalle posizioni dei pianeti e le avevano inserite come dati nelle equazioni matematiche per calcolare le loro orbite; ora, invece, avrebbero dovuto procedere in senso inverso. L'orbita effettiva di Urano era stata seguita per decenni, e la sfida era ora quella di scoprire dove andava messo un pianeta per spiegare le irregolarità della sua traiettoria.

Si trattava di un'impresa molto ardua sotto il profilo matematico, ma due teorici raccolsero il guanto di sfida: John Couch Adams in Inghilterra e Urbain Le Verrier in Francia, che riuscirono entrambi a invertire il problema e a individuare la possibile posizione di un nuovo pianeta. Adams aveva

terminato i suoi calcoli nel settembre del 1845 e si era rivolto agli astronomi inglesi affinché cercassero di localizzare il nuovo corpo ma, a quanto pare, la sua mancanza di credenziali e la sua condotta piuttosto asociale (forse a causa della sindrome di Asperger) lo rendevano poco gradito alle autorità; l'Astronomo reale, inoltre, era in quel momento distratto da uno scandaloso caso di omicidio che vedeva coinvolto uno dei suoi assistenti. Di conseguenza, in Inghilterra la predizione di Adams venne ignorata. Anche Le Verrier, che aveva completato i calcoli nel giugno del 1846, incontrò problemi analoghi nel convincere le autorità astronomiche francesi a spendere il prezioso tempo di osservazione con i telescopi per cercare un ipotetico pianeta; alla fine, quindi, decise di rivolgersi all'Osservatorio di Berlino.

Gli astronomi tedeschi si dimostrarono più collaborativi. Il 23 settembre 1846, Johann Gottfried Galle puntò il telescopio di Fraunhofer verso la posizione dove, secondo i calcoli di Le Verrier, si sarebbe dovuto trovare il nuovo pianeta, individuando un punto di luce che non compariva su nessuna delle carte astrali dell'osservatorio. La notte successiva, quel puntino si era spostato proprio di quanto indicavano i calcoli di Le Verrier.

L'annuncio della scoperta di un altro nuovo pianeta venne salutato con grande eccitazione da molti, mentre gli astronomi inglesi fecero la figura degli stupidi per non aver controllato le predizioni di Adams. Herschel, che era entrato a far parte del Board of Visitors del Royal Observatory, tentò di dimostrare che Adams aveva fatto la predizione per primo. La questione sfociò inevitabilmente in un'aspra disputa sulla priorità e il nome del pianeta diventò un caso politico, con i francesi che volevano chiamarlo come Le Verrier e gli inglesi che difendevano la consuetudine dei nomi delle divinità romane. Alla fine, la comunità internazionale decise di chiamarlo Nettuno.

La capacità della matematica di dirci che cosa potrebbe esserci là fuori è straordinaria. Come osservò con ironia François Arago, Le Verrier aveva scoperto Nettuno «con la punta della sua penna»; certo, occorsero poi le osservazioni di

Galle a Berlino per confermare che la teoria corrispondeva di fatto alla realtà.

Pur essendo vincolati alla superficie terrestre, gli uomini erano comunque riusciti a spingersi verso i confini del sistema solare. Fino a che punto può arrivare la nostra esplorazione? Dopo averci consentito di raggiungere quei confini, il telescopio ci avrebbe anche rivelato i limiti teorici della portata della nostra visione: la luce, infatti, impiega tempo per arrivare fino a noi.

Limiti di velocità cosmici

Il telescopio contribuì a risolvere una disputa che si protraeva fin dai tempi dell'antichità: la luce diffonde istantaneamente la propria presenza attraverso lo spazio o impiega tempo per viaggiare da un posto all'altro? Aristotele, per esempio, non riteneva che la luce si muovesse: poteva solo essere presente oppure no. Non era il solo a pensarla così. Secondo gli antichi greci, perché ci fosse la visione la luce doveva viaggiare dall'occhio all'oggetto. Stando così le cose, argomentava il matematico Erone di Alessandria, la luce doveva essere istantanea: come potremmo, altrimenti, vedere subito le stelle più remote non appena apriamo gli occhi?

Fu lo studioso islamico Alhazen a sostenere, nel suo *Libro sull'ottica*, che la luce viaggia nella direzione opposta, ossia dall'oggetto all'occhio. Anche in questo caso, comunque, molti continuavano a ritenere che la sua velocità dovesse essere infinita. Galileo, tuttavia, non ne era persuaso. Pensava che se la luce impiegava del tempo per viaggiare dalla sua fonte, doveva essere possibile misurarlo, e propose quindi di scoprire una luce e vedere quanto ci voleva per scorgerla a qualche chilometro di distanza. La scala da lui ipotizzata, però, era troppo piccola per poter registrare un ritardo. Cartesio la aumentò, rendendosi conto che se la luce avesse impiegato tempo per raggiungere la Terra dal Sole e dalla Luna, le tempistiche delle eclissi lunari sarebbero state leggermente sfasate rispetto alle nostre aspettative; tuttavia, anche in questo

caso non venne registrato alcuno scostamento. Galileo e Cartesio erano entrambi sulla pista giusta, ma il problema era che la velocità della luce è tale da far sì che anche la distanza che ci separa dalla Luna sia troppo breve per poter rilevare una discrepanza.

Alla fine, furono le lune di Giove – e non la Luna della Terra – a permettere di dimostrare che la luce impiega tempo ad attraversare lo spazio. Galileo le aveva proposte come un mezzo per risolvere il problema della longitudine, misurando il tempo sulla base del momento in cui la sua luna più interna, Io, entra nella fascia d'ombra del pianeta. Io impiega 42,5 ore per compiere un'orbita attorno a Giove, un intervallo abbastanza regolare da poter essere usato come un orologio cosmico. Compilando una tabella dei tempi in cui queste eclissi si verificavano a Firenze e annotando quindi quando venivano osservate in un'altra località, era possibile dedurre la longitudine di quest'ultima rispetto a Firenze. Questo metodo non prese piede per determinare la longitudine in mare (che era il grande problema dell'epoca), ma veniva adoperato per stabilirla sulla terraferma.

Fu l'astronomo danese Ole Rømer a usare le lune di Giove, nel 1676, per scoprire la velocità finita della luce. Mentre lavorava all'Osservatorio di Parigi, registrò i tempi in cui Io spariva nell'ombra di Giove e notò che sembravano dipendere da dove si trovava la Terra nella sua orbita attorno al Sole: se la Terra era dalla parte opposta rispetto a Giove, pareva esserci un ritardo. Rømer comprese che questo era dovuto al fatto che la luce impiegava più tempo per raggiungere la Terra rispetto a quando quest'ultima si trovava dalla stessa parte di Giove. La scoperta venne annunciata il 22 agosto 1676 all'Accademia reale delle scienze di Parigi da Giovanni Cassini, il direttore dell'osservatorio parigino, il quale spiegò che gli astronomi avrebbero dovuto correggere le tabelle che stabilivano i tempi delle eclissi di Io:

> Ciò sembra dovuto al fatto che la luce impiega del tempo per arrivare a noi dal satellite; a quanto pare, alla luce occorrono dai dieci agli undici minuti per attraversare una distanza pari al semidiametro dell'orbita terrestre.

Secondo le attuali misurazioni, la luce impiega 8 minuti e 20 secondi per percorrere questo tragitto; gli astronomi del

Seicento, quindi, non si scostavano molto dal vero. In seguito venne effettuata un'intera serie di esperimenti volti a determinare il valore numerico della velocità della luce attraverso lo spazio vuoto. Trattandosi di una velocità dell'ordine di circa 300 milioni di metri al secondo, non c'è da stupirsi che molti pensassero che fosse infinita. Ora, con i telescopi che permettevano di misurare immense distanze nello spazio, la velocità della luce sarebbe diventata un limite importante per ogni tentativo di spingere il nostro sguardo agli estremi confini dell'universo.

In effetti, il fatto che la luce impieghi tempo per attraversare lo spazio significa che, quando scruto l'universo, in realtà sto guardando indietro nel tempo. Un'istantanea del cielo ci mostra il Sole com'era 8 minuti e 20 secondi fa, la stella più vicina com'era quattro anni fa e le galassie più lontane com'erano miliardi di anni fa. È possibile che in questo momento, in qualche galassia remota, dei telescopi puntati sulla Terra stiano assistendo all'estinzione dei dinosauri, avvenuta circa 66 milioni di anni fa.

La velocità della luce è entrata a far parte del modo in cui gli astronomi misurano la vastità dello spazio: quando affermano che qualcosa si trova a un anno luce di distanza, stanno dicendo che la luce impiega un anno per viaggiare da quel punto fino a noi.

Le stelle nelle nostre vicinanze

Guardando la sfera celeste sulla mia scrivania, mi pare ridicolo che gli antichi greci pensassero alle stelle incastonate su un immenso globo celeste che racchiudeva l'universo e all'esterno del quale c'era il vuoto. Tuttavia, bisogna ammettere che, data la loro distanza dalla Terra, a occhio nudo le stelle sembrano tutte molto lontane: per gli astronomi dell'antichità, quindi, era impossibile cogliere una qualche profondità. L'invenzione del telescopio ha però reso le stelle un po' più vicine, abbastanza da permettere agli astronomi

moderni di vedere che non si trovavano tutte alla stessa distanza dalla Terra.

C'è un modo per dire se una stella è più vicina a noi di un'altra. Anche se siamo bloccati sulla superficie della Terra, quest'ultima si muove in relazione alle stelle, il che significa un progressivo cambiamento del nostro punto di osservazione sul cosmo: abbiamo così la possibilità di iniziare a togliere alcune delle stelle dalla superficie della sfera celeste e di dare profondità all'universo.

Se tenete il vostro dito indice di fronte a voi e guardate fuori dalla finestra muovendo la testa da una parte all'altra, noterete che le cose vicine (come il vostro dito) si spostano di una distanza relativa più grande rispetto a quelle più lontane. Questo effetto è chiamato parallasse. Gli astronomi fanno lo stesso quando osservano le stelle: confrontando le loro posizioni durante l'estate con quelle in inverno, possono dire quali sono più vicine alla Terra.

Di fatto, quando si imbatté nel nuovo pianeta Urano, Herschel stava proprio cercando di rilevare questa parallasse stellare. La differenza nelle posizioni di una stella è estremamente piccola e per rilevarla occorrono telescopi con un discreto livello di accuratezza. I tentativi di misurazione vennero coronati dal successo solo negli anni Trenta dell'Ottocento, quando l'astronomo e matematico tedesco Friedrich Bessel registrò le prime osservazioni precise della parallasse stellare. Per applicare la tecnica alle stelle vicine, gli astronomi devono ipotizzare, in sostanza, che le più lontane siano tutte collocate su una singola volta celeste che racchiude l'universo, più o meno come voleva il modello greco. Il punto è che, per rilevare la parallasse delle stelle vicine, le più lontane sembrano fisse e possono quindi essere usate come uno sfondo su cui cogliere l'apparente movimento di quelle vicine.

Bessel confrontò le posizioni di una stella chiamata 61 Cygni in estate e in inverno e quindi, costruendo il triangolo formato dalla stella con i due punti dell'orbita terrestre, calcolò uno degli angoli del triangolo. A quel punto, conoscendo la distanza della Terra dal Sole e la trigonometria,

gli astronomi poterono fare una prima stima della distanza delle stelle più vicine. Secondo i calcoli di Bessel, 61 Cygni era 660.000 volte più distante del Sole. Si sbagliava di circa il 10 per cento: in base ai calcoli attuali, 61 Cygni dista dalla Terra 721.000 volte più del Sole (11,41 anni luce). A dispetto di tale imprecisione, Bessel era riuscito a darci un'idea dell'autentica profondità dello spazio.

In seguito vennero fatti ulteriori calcoli su altre stelle ancora più vicine. La più vicina in assoluto venne individuata solo nel 1915 dall'astronomo scozzese Robert Innes. Proxima Centauri è troppo debole per essere osservata a occhio nudo (perciò è stata scoperta così tardi), ma il calcolo della parallasse stabilì che dista dalla Terra 268.326 volte più del Sole, pari a 4,24 anni luce.

Il metodo della parallasse stellare ha iniziato a togliere alcune delle stelle dalla mia sfera celeste avvicinandole alla Terra. Ammesso che una stella non si trovi a più di 400 anni luce di distanza da noi, questo metodo funziona; tuttavia, le stelle sembravano perlopiù così distanti da poter rimanere incollate sulla volta della mia sfera di carta. L'analisi delle lunghezze d'onda della luce proveniente da questi astri ci avrebbe fatto compiere il grande passo successivo verso i confini dell'universo.

Brilla, brilla, piccola stellina

Quanto più una stella è lontana, meno luminosa ci appare. C'è però un problema nell'usare questo criterio per determinare la distanza di una stella: come facciamo a sapere se stiamo guardando una stella più luminosa ma molto lontana (come 61 Cygni, visibile a occhio nudo), o una stella più spenta ma anche più vicina (come Proxima Centauri)? La luminosità apparente di una stella è data da una combinazione fra la sua luminosità reale e la sua distanza dalla Terra. Quindi, come fanno gli astronomi a valutare le distanze tramite la luminosità? Il punto è che, in molti casi, il colore della luce emessa da una stella ci dà sufficienti informazioni per sapere

quanto dovrebbe brillare; così, misurando la sua luminosità apparente, possiamo stabilire qual è la sua distanza.

Quantificando la luce proveniente da una stella e analizzandone le frequenze, gli scienziati videro che alcune frequenze caratteristiche erano assenti: la luce veniva assorbita da particolari atomi del corpo celeste. Oltre a dimostrare che la famosa affermazione di Comte secondo la quale non avremmo mai potuto conoscere la composizione chimica delle stelle era sbagliata, questa scoperta era utile a calcolare la luminosità reale di una stella. Quando gli astronomi osservarono delle stelle vicine la cui distanza da noi (e, quindi, la cui luminosità reale) era nota, individuarono una relazione diretta tra le differenti frequenze assorbite dalla stella e la luminosità con cui splendeva.

Si potevano usare le frequenze di luce assenti come una misura della luminosità assoluta. A questo punto, considerando le stelle le cui distanze erano troppo elevate per poter applicare il metodo della parallasse e misurando la loro luminosità apparente e le frequenze assenti, si poté calcolare la loro lontananza. In questo modo, gli astronomi ebbero un'idea molto più chiara dell'autentica profondità dello spazio.

Tuttavia, fu una stella pulsante molto particolare a fornirci il modo migliore per misurare le distanze nell'universo. Una stella cefeide ha una luminosità variabile e, nel 1912, l'astronoma americana Henrietta Leavitt scoprì come usare queste stelle variabili per orientarsi nell'universo. All'epoca lavorava non come astronoma ma come «calcolatrice» all'Harvard College Observatory, estraendo i dati dalle lastre fotografiche per 30 centesimi l'ora. Alle donne era precluso l'uso dei telescopi. Le era stato assegnato il compito di analizzare le stelle la cui luminosità cresceva e diminuiva in un certo periodo di tempo. Curiosa di sapere se il pulsare di questi astri seguisse un qualche modello, la Leavitt si concentrò su un gruppo di stelle situate nella Piccola Nube di Magellano e che, di conseguenza, avrebbero dovuto trovarsi più o meno a distanze simili dalla Terra.

Tracciando un grafico della luminosità in relazione al periodo di pulsazione, scoprì un modello molto chiaro. Il

tempo impiegato da una stella cefeide per pulsare è direttamente correlato alla sua luminosità: è più luminosa quanto più lungo è il periodo di pulsazione. Pertanto, per conoscere la luminosità reale di una cefeide, basta misurare il suo periodo di pulsazione, assai più semplice che misurare le frequenze di luce mancanti. Erano quindi gli astri ideali per stabilire le distanze.

Se una stella cefeide sta pulsando lentamente ma sembra molto debole, deve trovarsi a una grande distanza; dal canto opposto, una cefeide che pulsa rapidamente e appare molto luminosa dev'essere vicina. Con questi nuovi criteri a disposizione, l'universo iniziò a prendere forma. Altre stelle si staccarono dalla volta della sfera celeste e presero posto nell'emergente mappa della Via Lattea. Inoltre, si scoprì che il nostro Sole era confinato in un angolo di un'enorme massa di stelle che ruotava su se stessa formando una spirale.

Ma l'universo finiva davvero qui? Nel cielo c'erano alcune macchie luminose che non sembravano essere singole stelle ma, piuttosto, parevano la luce proveniente da centinaia di miliardi di soli. Queste nubi facevano parte della nostra galassia, la Via Lattea, o formavano un'altra galassia simile alla nostra ma completamente separata? La prima di queste regioni a essere indagata fu una piccola nube identificata dall'astronomo persiano al-Sufi nel X secolo; abbastanza luminosa da essere visibile a occhio nudo, sarebbe diventata nota come la nebulosa di Andromeda. L'ipotesi che questa e altre nubi simili potessero essere di fatto galassie venne avanzata per la prima volta nel 1750 dall'astronomo inglese Thomas Wright. Dopo aver letto delle idee di Wright, Immanuel Kant coniò la romantica espressione «universi isola».

Le discussioni sullo status di queste nebulose proseguirono per anni, culminando in uno scontro fra gruppi rivali durante un evento oggi noto come il Grande dibattito, tenutosi presso lo Smithsonian Museum of Natural History nel 1920. C'era in gioco la questione della grandezza e dell'estensione dell'universo. L'astronomo Harlow Shapely sostenne che queste nubi dovevano far parte della nostra galassia per essere così luminose. Herbert Curtis ribatté che il numero delle *novae*

(cataclismatiche esplosioni nucleari a cui le stelle possono andare incontro) contate in questa nebulosa superava tutte quelle registrate nella nostra intera galassia: com'era quindi possibile che una regione così ricca di *novae* fosse una semplice parte della nostra Via Lattea?

Alla fine, a dimostrare che Andromeda era un'altra galassia furono le osservazioni dell'astronomo americano Edwin Hubble, che nel 1925 usò il telescopio Hooker installato in cima a Mount Wilson (in California), che all'epoca era il più grande della categoria, per analizzare la distanza di questa nube.

Hubble individuò una stella in particolare utilizzabile per calcolare tale distanza. Al centro di questa nube c'era una delle stelle cefeidi studiate dalla Leavitt il cui periodo di pulsazione era di 31 giorni; in base alle analisi dell'astronoma sarebbe quindi dovuta essere molto luminosa, mentre al telescopio appariva debolissima. Combinando il periodo di pulsazione con una misurazione della luminosità apparente della stella, Hubble stabilì che doveva trovarsi a 2,5 milioni di anni luce dal nostro Sole; le stelle della Via Lattea, dal canto opposto, si trovavano a un massimo di 100.000 anni luce di distanza l'una dall'altra. La scoperta della Leavitt e i calcoli di Hubble imposero un drastico mutamento nella nostra visione dell'universo, dimostrando che era molto più grande di quanto chiunque avesse mai immaginato.

Con la sua idea di sfruttare le stelle cefeidi per orientarsi fra le distanze siderali, la Leavitt trasformò la nostra immagine dell'universo in un modo così radicale che, nel 1924, il matematico svedese Gösta Mittag-Leffler avrebbe voluto candidarla per il premio Nobel; rimase sconvolto quando scoprì che la donna era morta di cancro quattro anni prima.

La comprensione dell'estensione delle galassie lontane diede agli uomini un'idea dell'autentica natura dello spazio. Ma quanto si estendeva l'universo al di là di esse? I primi esploratori che lasciavano i loro villaggi avevano senz'altro l'impressione che la Terra fosse enorme e potevano magari pensare che si estendesse all'infinito; tuttavia, man mano che i loro viaggi si fecero più lunghi e frequenti, gli uomini

arrivarono a capire che la superficie terrestre era finita e percorribile. E per quanto riguarda lo spazio? Quando lasciamo la nostra galassia, possiamo abituarci all'idea di come il nostro villaggio cosmico sia inquadrato in uno spazio più grande?

Un immenso gioco di asteroidi

Posso facilmente rappresentare la Terra come finita ma priva di un confine: per capire ciò che intendo, vi basta pensare alla superficie di una sfera. Ma come può lo spazio essere finito? Uno dei miei film preferiti che esplora questo enigma è *The Truman Show*, dove Jim Carrey (nelle vesti di Truman Burbank) non si rende conto che il suo intero universo è un reality show televisivo messo in scena in un'enorme cupola. Alla fine, spinto dai dubbi sul suo mondo, sale in barca per attraversare le acque che circondano il suo isolotto di Seahaven, solo per scoprire che quello che pensava fosse un cielo infinito è di fatto una scenografia dipinta sulle pareti dello studio. Oltre il confine del suo universo, trova le telecamere che filmavano ogni suo movimento.

Non penso che viviamo anche noi in un nostro *Truman Show*. Non credo che, mettendomi a viaggiare nello spazio, finirei per andare a sbattere contro le pareti di uno studio cinematografico (o di una sfera celeste, come il mio modello) che racchiude il mio mondo. E sono convinto che la maggior parte delle persone la pensi come me. In fin dei conti, un modello del genere fa solo sorgere domande su cosa ci sia oltre quel confine. Una troupe cinematografica celeste che ci sta osservando? E che cosa succede ai membri di quella troupe quando fanno il mio stesso viaggio nel loro mondo? Ci sono infinite troupe e infinite scenografie, una dentro l'altra? Ecco perché la maggior parte delle persone, se messe alle strette, conclude che l'unico modo per risolvere questo enigma consiste nel credere in un universo infinito.

I matematici hanno però una terza alternativa, che postula un universo privo di confini e comunque finito. Lì, se vi

mettete a viaggiare nello spazio, anziché allontanarvi sempre di più finite per ritornare al punto da cui siete partiti, proprio come un esploratore terrestre che decida di circumnavigare la Terra.

Per farvi un'idea di come potrebbe essere questo universo, potete prendere in considerazione il piccolo universo di un videogioco. Il gioco Asteroids, creato da Atari nel 1979, offre un perfetto esempio di un universo bidimensionale finito ma privo di confini. È costituito semplicemente dallo schermo di un computer; la cosa interessante, però, è che quando un'astronave arriva alla sommità dello schermo, anziché rimbalzare indietro sbattendo contro il confine (come in una sorta di *Truman Show* 2D), riappare dal fondo senza soluzione di continuità. Dal punto di vista degli astronauti all'interno della navicella, si tratterebbe di un interminabile viaggio attraverso lo spazio. Lo stesso vale quando l'astronave arriva al margine sinistro dello schermo: anche in questo caso, non sbatte contro un muro ma, semplicemente, riappare sulla destra. Gli astronauti potrebbero iniziare a notare che i punti salienti del paesaggio continuano a ripetersi; tuttavia, in un universo in evoluzione potrebbe essere difficile riconoscere le cose quando ci si passa accanto per una seconda o terza volta.

Questo universo di Asteroids ha di fatto una forma riconoscibile. Se prendiamo una terza dimensione in cui ripiegarlo su se stesso, possiamo congiungere la sommità e il fondo dello schermo per formare un cilindro; quindi, dato che anche i lati destro e sinistro sono fra loro connessi, possiamo unire le due estremità del cilindro per creare una ciambella, o quello che i matematici chiamano un toro. La superficie di questa figura tridimensionale è l'universo finito di Asteroids.

Se prendo una qualunque figura tridimensionale finita, la sua superficie bidimensionale costituirà un altro esempio di un universo finito ma privo di confini. La superficie di una sfera, per esempio, è un altro universo bidimensionale di questo tipo. Questi universi bidimensionali non sono dei semplici giochi matematici ma sono fondamentali per muoversi sulla Terra. Di fatto, numerose culture si sono chieste se la Terra si estendesse all'infinito oppure avesse dei margini dai quali una persona sarebbe potuta cadere. Il modello della Terra elaborato da

molte civiltà antiche consisteva proprio in un disco finito circondato dall'acqua, un po' come il mondo di Truman.

Fu solo con i pitagorici, nel V secolo a.C., che l'idea di una Terra sferica iniziò a prendere piede. Lo scomparire delle navi all'orizzonte, l'ombra proiettata dalla Terra sulla Luna durante le eclissi, le variazioni nella posizione in cielo del Sole e delle stelle quando ci si sposta a sud, tutte queste cose contribuirono al cambiamento di prospettiva. Fu comunque la circumnavigazione del mondo organizzata nel 1522 da Ferdinando Magellano (ucciso durante il viaggio) a dimostrare al di là di ogni dubbio la sfericità della Terra.

E per quanto riguarda l'universo? Ha una forma? Ci troviamo in una situazione simile a quella delle antiche culture che, contemplando la Terra, si chiedevano se si estendesse all'infinito, se avesse dei margini o se si ripiegasse in qualche modo su se stessa.

Ma come posso ripiegare un universo tridimensionale in modo che abbia un volume finito ma sia privo di confini? La matematica viene in nostro soccorso, permettendoci di portare il nostro universo tridimensionale in uno spazio con più dimensioni per poi ripiegarlo su se stesso come ho fatto con Asteroids. Anche se non posso rappresentarmi fisicamente un simile ripiegamento, il linguaggio della matematica mi dà le equazioni per descrivere e – ancora più importante – per esplorare le proprietà di questi universi tridimensionali finiti.

Così, per esempio, noi potremmo vivere in una versione tridimensionale di Asteroids. Forse, in sostanza, il nostro universo è un enorme cubo con sei facce, come il mio dado da casinò: quando un'astronave arriva a una di queste facce, invece di rimbalzare indietro la attraversa rientrando, senza soluzione di continuità, dalla faccia opposta. Nel gioco di Asteroids avevamo due direzioni le cui estremità venivano a congiungersi, destra-sinistra e alto-basso; nel mio universo tridimensionale cubico, questa congiunzione si verifica anche nella terza direzione. Se potessi mettere questo cubo in un universo quadridimensionale, potrei ripiegarlo su se stesso congiungendo le sue facce opposte per creare una ciambella (o

toro) quadridimensionale, la cui superficie tridimensionale costituirebbe il nostro universo.

Il nostro universo potrebbe però anche avere altre forme. Un cerchio è una figura bidimensionale finita la cui superficie è un universo unidimensionale finito. Una sfera è una figura tridimensionale finita la cui superficie è un universo bidimensionale finito. Le equazioni matematiche possono essere usate per costruire una sfera quadridimensionale che abbia per superficie un universo tridimensionale finito, un altro modello che potrebbe rappresentare il nostro universo.

Anche se la matematica ci offre diversi possibili candidati per un universo finito ma privo di confini, come potremo mai sapere se il nostro universo è di fatto finito e quale forma potrebbe in tal caso avere? Dobbiamo attendere che un astro-Magellano lo circumnavighi? Data la scala dell'universo conosciuto, l'esplorazione umana sembra una via impercorribile per dimostrare se è finito. Tuttavia, là fuori ci sono esploratori che viaggiano attraverso l'universo da miliardi di anni e possono fornirci qualche informazione sulla sua eventuale finitezza: i fotoni di luce.

Magellani cosmici

La luce è un grande esploratore. Siamo costantemente inondati da raggi di luce che hanno trascorso miliardi di anni viaggiando per l'universo; qualcuno di essi potrebbe portare con sé qualche informazione in grado di dirci se l'universo sia finito? Ho già considerato che cosa accadrebbe a un'astronave che si tuffasse nelle profondità dello spazio: in questi universi finiti, finirebbe per ritornare alla sua posizione di partenza, proprio come la spedizione di Magellano fece ritorno a Siviglia nel 1522.

Lo stesso potrebbe accadere anche alla luce. Immaginate un fotone partito dal nostro Sole nei suoi primi anni di vita, circa 4,5 miliardi di anni fa. Supponiamo ora di vivere sulla superficie di una ciambella quadridimensionale, l'universo a forma di cubo dove le facce opposte sono tra loro congiunte.

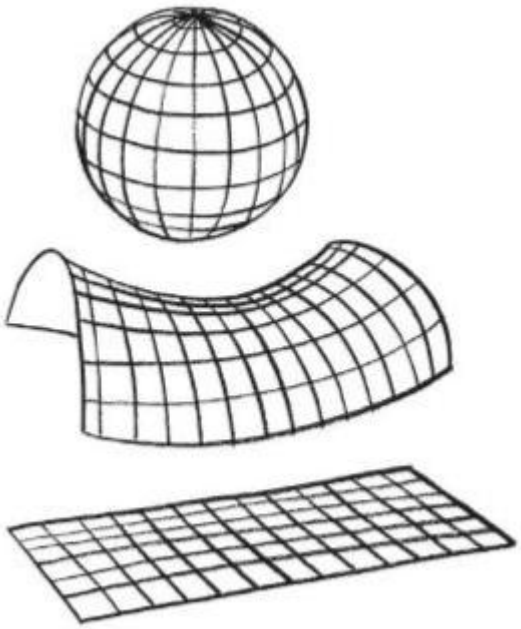
Che cosa accade alla luce quando giunge a una di queste facce? La attraversa riapparendo, senza soluzione di continuità, dalla faccia opposta, da dove può quindi riprendere il suo viaggio verso il punto da cui è partita. Ammesso che non ci siano ostacoli sul suo cammino, il fotone potrebbe così ritornare al sistema solare ed entrare nel telescopio di un osservatore sulla Terra, che lo rileverebbe per la prima volta dopo il suo lungo viaggio. Che cosa vedrebbe, quindi, il nostro astronomo? A dire il vero, niente di speciale: gli sembrerebbe di osservare la luce di una stella remota nei suoi primi anni di vita. Di fatto starebbe guardando il nostro Sole com'era 4,5 miliardi di anni fa, ma non sarebbe affatto facile rendersene conto.

Ciò, tuttavia, ci offre un possibile approccio per dimostrare che l'universo è finito, in quanto possiamo guardare nella direzione opposta e vedere se da là ci arriva una qualche immagine simile a ciò che conosciamo. Alcuni ricercatori in Francia, Polonia e Stati Uniti hanno osservato l'immagine della luce proveniente dall'universo primordiale nella speranza che qualche parte della mappa che abbiamo tracciato potesse corrispondere.

Con loro grande gioia e sorpresa, hanno creduto di individuare i primi accenni di una qualche corrispondenza nei dati e hanno iniziato ad analizzare quali forme potrebbero dare origine agli schemi di lunghezze d'onda che stavano osservando. I risultati hanno suggerito che il miglior candidato per la forma di un universo in grado di produrre tali schemi sarebbe un dodecaedro, il solido regolare (utilizzabile come dado) formato da dodici facce pentagonali. È interessante notare come due millenni fa Platone avesse ipotizzato che la forma della sfera celeste in cui erano incastonate le stelle non fosse una sfera ma proprio un dodecaedro. In questa interpretazione moderna, però, lo spazio verrebbe a congiungersi in corrispondenza delle facce opposte del dodecaedro, come nel caso del cubo considerato sopra. I ricercatori hanno dovuto dare una leggera torsione (di 36 gradi) ai pentagoni per poter fare in modo che combaciassero. Tuttavia, la maggioranza degli astronomi non è convinta della

validità di questi risultati; è difficile dire se le corrispondenze trovate non siano soltanto il frutto di coincidenze casuali.

C'è comunque un altro modo in cui la luce potrebbe darci qualche informazione sulla geometria del nostro universo. Ci dice infatti come l'universo si incurva. Supponiamo di dare al nostro esploratore in partenza dal suo villaggio un telescopio e una monotona pianura in cui avventurarsi. All'inizio la Terra gli sembrerà piatta, ma dopo un po' la sua curvatura diventerà evidente: guardando indietro, non potrà più vedere il suo villaggio, segno che qualcosa si è interposto. Se la curvatura continua per l'intera superficie, alla fine quest'ultima si congiungerà formando una superficie finita. La curvatura come quella di una sfera è detta curvatura positiva. Se una superficie è piatta, potrebbe estendersi per sempre ed essere infinita, ma potrebbe anche essere finita (come in Asteroids, dove l'universo sullo schermo è piatto ma finito); nel caso delle superfici piatte, si parla di curvatura zero. C'è poi un terzo tipo di curvatura, simile a quella della sella di un cavallo (o di una patatina Pringles), che sembra scendere in una direzione e salire nell'altra; è chiamata curvatura negativa, in contrasto con la curvatura positiva della superficie di una sfera, e dà origine a superfici infinite (e non finite come quella della sfera).



Superfici bidimensionali con curvatura positiva, negativa e zero.

Come la superficie bidimensionale della Terra può incurvarsi in un modo o nell'altro, così anche uno spazio tridimensionale può avere una curvatura, la cui misurazione può darci un'idea di come potrebbe ripiegarsi tale spazio. Se, come nel caso della superficie della Terra, la curvatura dell'universo è nel complesso positiva, esso si ripiegherà su se stesso formando una figura finita; se è negativa, sarà infinito; se la curvatura è zero, potrà essere infinito o finito, come il nostro universo a forma di cubo con le facce opposte tra loro congiunte.

Per rilevare la curvatura complessiva dello spazio possiamo esaminare la luce che lo attraversa. Che cosa vediamo? Be', sembra quasi piatto, ma non si può stabilire se sia assolutamente piatto o se ci sia una piccola curvatura che potrebbe farlo ripiegare su se stesso. I margini sembrano essere talmente piccoli che è difficile dire se saremo mai in grado di determinare tale curvatura con una accuratezza sufficiente a farci capire se e in che modo lo spazio si ripieghi.

C'è inoltre un altro problema riguardo alla reale possibilità di conoscere la curvatura dell'universo. Gran parte della nostra esplorazione dello spazio dipende da un'ipotesi: il cosiddetto principio copernicano, secondo cui il posto dove ci troviamo nell'universo non ha nulla di speciale. Un tempo pensavamo di essere al centro di tutto, ma Copernico ha messo fine a tale credenza; così, oggi riteniamo che la parte di universo che ci circonda sia più o meno simile a ogni altra parte. Questo è senza dubbio ciò che ci dicono i dati a nostra disposizione, ma le cose potrebbero anche stare diversamente: è cioè possibile che la parte di universo che vediamo sia alquanto speciale.

Supponiamo, per esempio, che il nostro esploratore terrestre viva su un pianeta dalla forma semisferica: una mezza sfera con un fondo perfettamente piatto. Se il suo villaggio si trova sul fondo piatto, lui penserà che l'intero pianeta sia piatto fino al momento in cui, proseguendo nel suo cammino, si imbatterà in un cambiamento improvviso della curvatura. Forse anche l'universo potrebbe essere così: piatto nella regione che possiamo osservare ma totalmente diverso oltre i limiti di quest'ultima. Come potremo mai sapere se l'universo è davvero omogeneo come pensiamo?

Si tratta quindi di vedere se la luce stia davvero percorrendo dei tragitti circolari attorno a un universo finito, come una sorta di spedizione di Magellano cosmica. In tal caso, avremmo la possibilità di scoprire se l'universo è finito. O, magari, la curvatura dell'universo è tale da permetterci di calcolare come si ripieghi su se stesso.

Magellano circumnavigò un pianeta statico. Il nostro universo, invece, è un po' più dinamico di quanto pensavamo, come scoprì Hubble – il Magellano dello spazio – quando iniziò ad analizzare la luce proveniente da stelle appartenenti a galassie remote.

8

«Dentro e fuori, sopra, intorno e sotto,

Tutto non è nient'altro che uno spettacolo di ombre,

In una lanterna magica dove la candela è il Sole,

Attorno a cui noi andiamo e veniamo come figure fantasma.»

UMAR KHAYYAM, *Rub'ayyat*

Da piccolo ero solito fantasticare sul fatto che un giorno sarei stato in grado di sollevare lo sguardo verso il cielo notturno e dire con sicurezza, indicando le varie stelle e i pianeti: «Quella è Betelgeuse» o: «Vedi quel puntino luminoso laggiù? In realtà non è una stella, bensì il pianeta Venere». Uno dei miei problemi, però, è che ho una pessima memoria: davanti a qualcosa di casuale, come le stelle sparpagliate nel firmamento, senza una qualche logica a guidarmi trovo molto difficile ricordarmi i nomi. È proprio questo, del resto, il motivo per cui abbiamo creato gli schemi delle costellazioni (come il Grande Carro, o Orione il Cacciatore), che ci aiutano a districarci fra tutti questi puntini casuali di luce.

Col tempo, però, è emerso che non sono molto tagliato per l'astronomia anche per una questione di carattere fisico. Il mio primo tentativo di osservare lo spazio più in profondità fu una visita al telescopio di Mill Hill, nella parte settentrionale di Londra. In quella occasione, il mio desiderio di scrutare fino ai confini dell'universo venne mandato all'aria dal flagello degli astronomi: le nuvole.

La volta dopo, quindi, tentai di portarmi sopra l'altezza delle nuvole, cosa che richiese più sforzo che saltare sulla Northern Line per Mill Hill. Presi un treno per la Svizzera e

feci una bella escursione alpina fino a Jungfraujoch, da dove un ascensore scavato nella roccia mi portò al picco della montagna dove sorge l'osservatorio Sphinx, a 3571 metri sopra il livello del mare.

Costruito nel 1912, l'osservatorio sembra il covo del cattivo di uno dei film di James Bond. Mentre il Sole tramontava sopra le nevi e i ghiacciai, mi preparai a una splendida serata di osservazione delle stelle. Il mio corpo, però, non era d'accordo. Avevo già iniziato ad avere i capogiri e la nausea, e non ero riuscito a mangiare molto; quindi, all'apparire delle prime stelle, mi prese un terribile mal di testa e dopo poco mi ritrovai a vomitare. Quando una coppia di anziani tedeschi mi disse che avevo tutti i sintomi del mal di montagna tranne uno, mi resi conto all'improvviso di non essere mai stato così in alto.

«E qual è l'ultimo sintomo?»

«La morte.»

Allora capii che il mio sogno di fare l'astronomo amatoriale non era poi così importante. Non ne valeva la pena. Presi il primo treno per tornare a una quota più ragionevole e i sintomi scomparvero. Dovevo guardare in faccia la realtà: ero un ragazzo della valle del Tamigi, nato a Londra, il cui corpo era fatto per guardare le stelle dalla comodità di un telescopio più vicino al livello del mare. Tuttavia, le osservazioni effettuate grazie ad alcuni dei grandi telescopi d'alta quota sparsi per il mondo ci hanno rivelato un fatto sorprendente: a un certo punto, nel futuro, non avrò così tante stelle da guardare, perché scompariranno oltre il nostro orizzonte cosmico!

L'universo visto attraverso le lenti rosse

Quando un'ambulanza viaggia a sirene spiegate, mentre si sta avvicinando la compressione delle onde sonore provoca l'accorciarsi della loro lunghezza d'onda e questo fa sì che il suono percepito dalle vostre orecchie sia più acuto; quindi, quando l'ambulanza si allontana dopo avervi oltrepassati, le

onde sonore si distendono, la loro lunghezza d'onda si allunga e, di conseguenza, percepite un suono più basso. Questo fenomeno è noto come effetto Doppler.

Lo stesso avviene con la luce. Quando una stella si allontana da noi, la sua luce si sposta verso la lunghezza d'onda del rosso, più lunga; se invece si avvicina, si sposta verso la lunghezza d'onda del blu, più corta. Dopo aver scoperto che la nostra galassia non aveva nulla di speciale ma era solo una delle tante, nel 1929 Edwin Hubble rivolse la propria attenzione all'analisi della luce proveniente da queste galassie per vedere come si stavano muovendo rispetto alla nostra. Non si aspettava che la luce delle stelle remote nelle galassie da lui osservate fosse sempre spostata verso il rosso; sembrava che stessero tutte fuggendo da noi e che nulla venisse nella nostra direzione. Ancora più interessante, poi, era il fatto che più le stelle erano lontane dalla nostra, più la loro lunghezza d'onda risultava spostata. Hubble non poteva credere che la Terra si trovasse in un posto così speciale dell'universo, ma comprese poi che c'era una spiegazione molto migliore: lo spazio stesso si stava espandendo simultaneamente in tutte le direzioni. Qualunque sia il vostro punto di osservazione, vi sembrerà che tutto si stia allontanando da voi. Lo spazio fra noi e le stelle si sta allargando e le galassie vengono trasportate dallo spazio in espansione come foglie nel vento.

Anche se la scoperta dell'espansione dell'universo viene spesso accreditata a Hubble, in realtà era già stata predetta dal prete gesuita Georges Lemaître due anni prima. Lemaître aveva dedotto l'espansione dell'universo come una conseguenza delle equazioni di Einstein per la gravitazione. Quando quest'ultimo lo venne a sapere, però, bocciò l'ipotesi senza mezzi termini: «I suoi calcoli potrebbero anche essere corretti, ma la sua fisica è pessima». Einstein era talmente sicuro che Lemaître avesse torto che finì per aggiungere nelle sue equazioni la cosiddetta costante cosmologica per costringere l'universo a rimanere statico e mandare così all'aria la predizione del gesuita.

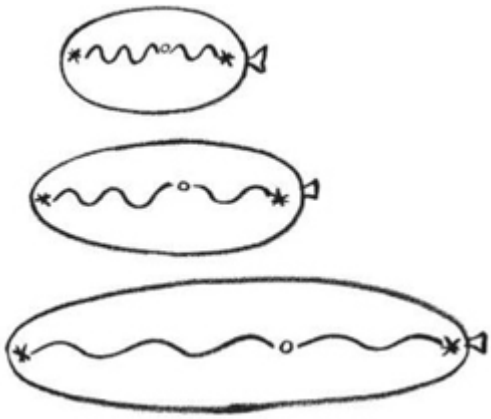
Lemaître aveva pubblicato i suoi risultati su un'oscura rivista belga, il che non giovò certo alla sua causa. Tuttavia, dopo essere venuto a conoscenza delle osservazioni di Hubble

a conferma dell'idea di un universo in espansione, Einstein cambiò registro. Le scoperte di Hubble e Lemaître furono i primi indizi del fatto che il nostro universo non è statico, come pensavano invece Einstein e molti altri scienziati. Lo spazio si sta allargando.

È proprio l'espansione dello spazio a far allungare la lunghezza d'onda della luce in arrivo; e quanto più a lungo questa luce ha viaggiato, tanto più la sua lunghezza d'onda si sarà gradualmente allungata. Così, se lo spostamento verso il rosso è più marcato, significa che durante il viaggio della luce lo spazio si è espanso di più e che, pertanto, la sua sorgente dev'essere più lontana dalla Terra.

Per comprendere la ragione per cui l'espansione dello spazio fa cambiare le lunghezze d'onda della luce, provate a gonfiare un palloncino e segnateci sopra tre punti con un pennarello: il primo rappresenta la Terra e il secondo e il terzo due stelle remote. Tracciate quindi due onde di luce di una lunghezza d'onda fissa tra le stelle e la Terra: questo sarà l'aspetto della luce nel momento in cui lascia le stelle. Quando la luce della stella più vicina raggiunge la Terra, il palloncino si è espanso; se lo gonfiate un po', la lunghezza d'onda diventa più lunga. La luce della stella distante impiega un po' più di tempo per raggiungere la Terra, in quanto l'universo si è espanso un po' di più; se gonfiate ulteriormente il palloncino, la lunghezza d'onda diventa ancora più lunga. Così, quanto più marcato è lo spostamento verso il rosso, tanto più la stella è distante dalla Terra.

Questo nuovo modo di misurare la distanza delle stelle remote ha aiutato gli astronomi a identificarne alcune che oggi si devono trovare a 30 miliardi di anni luce da noi. Il fatto che possiamo vedere qualcosa a 30 miliardi di anni luce di distanza potrebbe sembrare un paradosso, dato che, come vedremo presto, l'universo ha solo 13,8 miliardi di anni; dovete però tener presente che quella che stiamo osservando è la stella nel passato, quand'era abbastanza vicina perché la sua luce potesse raggiungerci. È solo attraverso l'analisi matematica dell'espansione che possiamo inferire che oggi quella stella si trova in un punto da cui la sua luce impiegherebbe 30 miliardi di anni per giungere fino a noi.



Nel primo palloncino, la luce lascia le stelle con la medesima lunghezza d'onda. Nel secondo, l'universo si è espanso e la luce proveniente dalla stella più vicina raggiunge la Terra; la lunghezza d'onda è diventata più lunga. Nel terzo, quando arriva la luce della stella più lontana, l'universo si è espanso ulteriormente e la lunghezza d'onda si è spostata ancora di più verso il rosso.

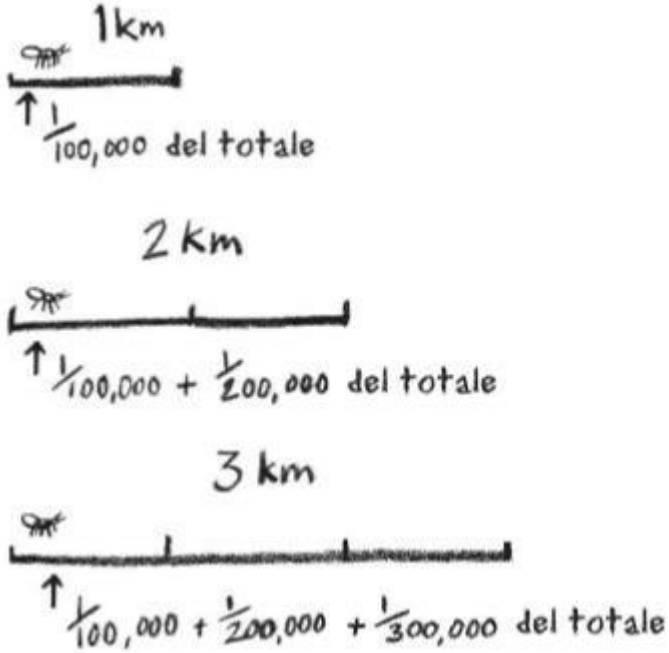
La formica e l'elastico

Se l'universo si sta espandendo, forse sarà impossibile vedere alcune stelle, che continueranno ad allontanarsi sempre di più da noi. Tuttavia, se l'universo si espande a una velocità costante, anche qualora tale velocità dovesse superare quella della luce, c'è una splendida argomentazione matematica a dimostrazione che, aspettando abbastanza a lungo, potremo infine vedere la luce di ogni singola stella (anche nel caso che l'universo sia infinito).

Il modo migliore per comprendere questo ragionamento consiste nel prendere un esempio che ha un esito curiosamente controintuitivo. Consideriamo una formica (che rappresenta un fotone di luce) posta su un'estremità di un elastico (lo spazio) fissato all'altra estremità (la Terra). L'estremità con la formica rappresenta una galassia remota.

L'elastico viene quindi tirato in modo che la sua estremità si muova a una velocità costante. Supponiamo che l'elastico abbia all'inizio una lunghezza di un chilometro e che si allunghi di un chilometro al secondo. La formica, dal canto suo, si muove lungo di esso molto più lentamente, percorrendo – poniamo – un centimetro al secondo. Di primo acchito, dato che la velocità dell'espansione è di gran lunga superiore a

quella della formica, sembra che quest'ultima non abbia nessuna chance di raggiungere l'estremità opposta, proprio come la luce proveniente da una galassia abbastanza lontana non sembra avere nessuna possibilità di raggiungere la Terra se lo spazio che le separa si espande a una velocità uniforme.



Qui entrano in gioco alcune sottigliezze. Per comprendere meglio quello che sta accadendo, permettetemi di aggiungere una condizione: l'elastico si espande solo allo scattare di ogni secondo, con un allungamento istantaneo. Così, dopo il primo secondo la formica ha percorso un centimetro, pari a 1/100.000 della distanza totale. A questo punto, l'elastico si espande. La cosa da notare è che anche se la distanza che la formica deve ora percorrere è aumentata, quella già percorsa resta sempre 1/100.000 del totale: l'espansione, infatti, ha proporzionalmente allungato anche la distanza già percorsa, allontanando un po' la formica dal suo punto di partenza.

La formica percorre quindi un altro centimetro su un elastico che ora è lungo 2 chilometri (pari a 1/200.000 della distanza totale); la distanza che ha coperto finora sarà pertanto 1/100.000 + 1/200.000 del totale. L'elastico si espande quindi di un altro chilometro; si allungano anche le parti già percorse, così che le loro proporzioni rispetto alla distanza totale rimangono invariate. La formica avanza di un altro centimetro, pari a 1/300.000 della distanza totale che ora è di 3 chilometri.

Ogni volta che l'elastico si allunga, il centimetro percorso dalla formica vale in proporzione sempre di meno. Ma qui entra in gioco il potere della matematica. Dopo *n* secondi, la porzione di elastico che la formica avrà coperto sarà:

$$\frac{1}{100.000}+\frac{1}{200.000}+\frac{1}{300.000}+\ldots+\frac{1}{n\times 100.000}=\frac{1}{100.000}\left(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\ldots+\frac{1}{n}\right)$$

Si tratta della serie armonica che il matematico d'Oresme aveva calcolato molti secoli fa e che abbiamo già incontrato all'inizio del capitolo precedente. D'Oresme ha dimostrato che questa serie può ingrandirsi a piacere; pertanto, posso prendere un *n* abbastanza grande da far sì che il valore della somma tra le parentesi sia maggiore di 100.000. La porzione di fascia che la formica ha percorso supererà così il 100 per cento, il che significa che sarà arrivata a destinazione!

In questo esempio, l'elastico si allunga a una velocità uniforme. Gli astronomi come Hubble pensavano che l'espansione dello spazio seguisse più o meno questo modello, forse anche con un rallentamento dovuto all'effetto decelerante della gravità. Ciò implica che anche qualora l'universo fosse infinito, la sua porzione a noi visibile dovrebbe diventare sempre più grande: dovremmo solo sederci e aspettare che i fotoni di luce arrivino da ogni stella, come una colonia di formiche che avanzano lentamente lungo l'elastico in espansione dello spazio.

Ciò non significa che, in teoria, se l'universo è infinito, dovremmo già ricevere la luce da qualunque stella, a prescindere dalla sua distanza? Forse possiamo già vedere un universo infinito. La cosa da ricordare, però, è che quanto più è lontana una stella, tanto più, quando la osserviamo, veniamo a guardare nel passato. Se riavvolgessimo abbastanza il nostro universo in espansione, scopriremmo che non c'erano stelle.

Riavvolgere l'universo

La scoperta dell'espansione dell'universo da parte di Hubble e Lemaître fornì la prova di quello che oggi gli scienziati

chiamano Big Bang. Se invertiamo il tempo, un universo in espansione si trasforma in un universo in contrazione. Continuando a contrarsi, però, finirà per diventare talmente denso che il suo stato verrà a subire un cambiamento drastico: di fatto, come lo stesso Lemaître comprese per primo, a un certo punto nel tempo questa espansione invertita conduce a un universo infinitamente denso, un punto da lui chiamato atomo primordiale o uovo cosmico. Questa singolarità viene oggi indicata dagli scienziati come il Big Bang. Trattandosi di un punto dove la relatività e la fisica quantistica devono fondersi in una teoria coerente, ci sono ancora dibattiti su fino a dove possiamo riavvolgere l'universo prima che gli attuali modelli perdano il loro potere esplicativo e sia necessario trovare nuove idee.

A scuola, quando venni a sapere per la prima volta del Big Bang, pensai che se l'universo era nato come un punto, doveva essere tuttora finito. Con un po' di matematica, però, è possibile mostrare come un universo infinito può comunque nascere come un singolo punto. Sembra una cosa straordinaria: com'è possibile che un punto privo di volume contenga uno spazio infinito? Per comprendere la questione è opportuno partire da uno spazio infinito e procedere all'indietro. Pensate uno spazio infinito un secondo dopo il Big Bang. Ora, prendete un punto arbitrario al centro di questo universo e considerate tutti i punti che si trovano a una distanza R dal primo; tutti questi punti sono situati sulla sfera di raggio R.

Ora, riavvolgiamo il tempo del nostro universo fino all'istante zero. Al tempo $t = 1/2$, i punti sulla sfera di raggio R si contrarranno nei punti su una sfera di raggio $1/2R$. A $t = 1/4$, si contrarranno ulteriormente in quelli su una sfera di raggio $1/4R$. Continuando a dimezzare il tempo nella direzione del Big Bang, questa sfera si fa sempre più piccola finché, a $t = 0$, diventa un singolo punto. Ora, questo ragionamento si può applicare a ogni possibile sfera, a prescindere dalla grandezza del suo raggio; pertanto, ogni punto nel mio spazio infinito si trova su una qualche sfera di raggio R e, quando riavvolgo il tempo fino a $t = 0$, collassa nel punto centrale da me scelto. Così, in un secondo la matematica mi dà un modo per

risucchiare uno spazio infinito in un singolo punto privo di volume.

Shakespeare espresse molto bene questo concetto per bocca di Amleto: «Potrei vivere nel guscio di una noce e sentirmi un re dello spazio infinito».

Certo, questo modello presenta dei problemi se lo spazio e il tempo sono quantizzati. Come abbiamo visto quando ho cercato di continuare a dimezzare il mio dado, potremmo arrivare a un punto dove non è più possibile farlo. È proprio questo il cuore del dibattito su quando la fisica quantistica incontra la relatività generale: tentare di capire che cosa succede quando contraiamo l'universo in un punto.

Molti definiscono il Big Bang come l'inizio del nostro universo, e nel prossimo Confine ritorneremo sulla natura di ciò che intendiamo quando parliamo di inizi e di tempo. Il Big Bang, comunque, ha senz'altro implicazioni concernenti la distanza massima a cui potrebbero spingersi le nostre osservazioni, in quanto implica che le stelle non possono esistere da più di 13,8 miliardi di anni (l'attuale stima su quanto tempo è trascorso dalla singolarità). Anzi, di fatto c'è anche voluto un periodo di evoluzione dell'universo prima che le stelle potessero formarsi.

Guardare nello spazio significa muoversi indietro nel tempo. Dato che prima di 13,8 miliardi di anni non c'erano stelle, significa che attorno a noi c'è una sfera oltre la quale non c'è nulla da vedere. La cosa straordinaria è che siamo così tornati al modello di universo proposto dagli antichi greci: c'è un'enorme sfera con la Terra al centro, e i fotoni da oltre quella sfera non hanno avuto il tempo di raggiungerci. Tale sfera diventa via via più grande col passare del tempo, e la domanda su quanto spazio sia contenuto all'interno di questo orizzonte in espansione troverà una risposta inattesa.

La galassia più lontana la cui distanza da noi è stata confermata è una la cui luce ha impiegato 13,1 miliardi di anni per raggiungerci, secondo l'annuncio fatto nell'ottobre del 2013. Tuttavia, ciò non significa che oggi questa galassia si trovi a 13,1 miliardi di anni luce da noi, in quanto in questi anni lo spazio fra noi e la galassia si è espanso. I calcoli

indicano che oggi tale galassia dista 30 miliardi di anni luce dalla Terra. C'è un'altra galassia, annunciata nel 2011, con uno spostamento verso il rosso ancora più marcato a indicare che la sua luce ha impiegato 13,41 miliardi di anni per raggiungerci; questa scoperta, però, non è stata ancora confermata.

Forse penserete che dovremmo essere in grado di vedere la luce risalente al primo momento dopo il Big Bang. Tuttavia, considerando gli stati dell'universo nel passato, crediamo che ci sia stato un periodo in cui la luce non poteva viaggiare attraverso lo spazio perché quest'ultimo era opaco: i fotoni, cioè, continuavano a sbattere tra una particella e l'altra. Dopo il Big Bang, ci vollero 378.000 anni prima che la densità delle particelle calasse abbastanza da permettere ai primi fotoni di iniziare il loro viaggio ininterrotto attraverso lo spazio; in quel momento, i fotoni ebbero sufficiente spazio per sfrecciare attraverso l'universo senza andare a urtare qualcosa che potesse assorbirli. Questi primi fotoni di luce visibili formano quella che oggi chiamiamo radiazione cosmica di fondo a microonde, e rappresentano la cosa più distante che possiamo vedere nello spazio. Sono come una sorta di fossile cosmico che ci parla dell'universo primordiale.

All'inizio del loro viaggio, quei primi fotoni che vediamo oggi nella radiazione di fondo a microonde si trovavano a soli 42 milioni di anni luce di distanza. Oggi, secondo le stime, la distanza tra quel punto di partenza nello spazio e la Terra si è allargata a 45,7 miliardi di anni luce. Questo è il margine estremo dell'universo visibile, l'orizzonte del cosmo che possiamo vedere. Ma la luce non è tutto.

Anche se la luce non poteva passare attraverso il plasma di spazio esistito per 378.000 anni dopo il Big Bang, i neutrini erano in grado di attraversarlo. Sono particelle che sembrano non fermarsi davanti a nulla (be', quasi nulla: di tanto in tanto, vanno a sbattere contro qualcosa che ci permette di rilevare la loro esistenza); ogni secondo, trilioni di neutrini attraversano inosservati il vostro corpo. Così, forse, se riuscissimo a rilevare i neutrini disaccoppiatisi 2 secondi dopo il Big Bang, potremmo «vedere» un po' più in là nello spazio; e magari

anche trovare uno sfondo cosmico neutrinico, ma sembra molto difficile.

In ogni caso, attorno alla Terra c'è una sfera che rappresenta un orizzonte oltre il quale non possiamo esplorare nemmeno con i telescopi più avanzati e sofisticati, in quanto la luce e i neutrini – o qualunque informazione – non hanno avuto il tempo di raggiungerci.

Questo orizzonte cosmico cresce al passare del tempo, permettendoci di vedere sempre più in là nello spazio. O, almeno, così pensavamo. Nel 1998, però, una scoperta ci ha rivelato l'allarmante fatto che, anziché estendersi nello spazio, il nostro orizzonte cosmico si sta contraendo. O, meglio, anche se l'orizzonte cosmico sta crescendo a una velocità costante, il tessuto sottostante dello spazio non si sta solo espandendo, ma la sua espansione sembra accelerare; e questa espansione accelerata dello spazio viene a spingere le cose che oggi possiamo vedere fuori dal nostro orizzonte cosmico, con implicazioni devastanti per quanto riguarda ciò che le future generazioni potranno conoscere.

Quando le stelle si spengono

Alcune stelle concludono la loro vita in una catastrofica esplosione chiamata supernova, la cui luminosità è talmente intensa da poter essere vista a enormi distanze. Le supernovae di tipo 1a hanno tutte la medesima luminosità assoluta, in qualunque parte dell'universo si trovino; confrontando questo valore con la loro luminosità apparente possiamo quindi calcolare la loro distanza.

Se l'universo si espandesse a una velocità costante, sulla base di quest'ultima sarebbe possibile predire il valore dello spostamento verso il rosso della luce di una supernova conoscendo la sua distanza dalla Terra. Tuttavia, quando hanno confrontato questo spostamento teorico con quello effettivamente registrato per alcune supernovae remote, gli astronomi sono rimasti scioccati: i valori non corrispondevano. Con una velocità di espansione costante, lo spostamento

sarebbe dovuto essere molto più alto. Passando alle galassie più lontane, la cui luce ci consente di guardare indietro nel tempo, il valore dello spostamento verso il rosso cambiava più lentamente che per le galassie più vicine. L'unica conclusione possibile era che l'espansione dell'universo, all'inizio molto più lenta, aveva poi iniziato ad accelerare, squarciando lo spazio.

A quanto pare, circa 7 miliardi di anni fa deve essersi verificato un cambiamento drammatico. Fino a quel punto, l'espansione sembrava rallentare, come ci si aspetterebbe tenendo conto dell'effetto frenante esercitato dalla forza gravitazionale della materia; poi però, verso la metà dell'attuale vita dell'universo, il tasso dell'espansione ha iniziato a crescere, come se qualcuno avesse all'improvviso pigiato sull'acceleratore. Il carburante che alimenta tale accelerazione è ciò che gli scienziati chiamano energia oscura.

Si direbbe che, nella prima metà della vita dell'universo, la densità della materia era sufficiente a determinare un effetto gravitazionale frenante; in seguito all'espansione, però, questa densità è diminuita fino al punto in cui l'energia oscura è stata abbastanza forte da prendere il sopravvento. L'energia oscura, stando agli scienziati, non è una cosa la cui densità decresca con l'espansione, bensì una proprietà dello spazio stesso.

Se l'accelerazione continuasse, le conseguenze sarebbero straordinarie. La sfera che contiene il nostro universo visibile cresce col passare del tempo cioè dovremmo poter vedere sempre più lontano nello spazio; purtroppo, però, quest'ultimo si espande così in fretta che le stelle che prima si trovavano all'interno della sfera dell'universo visibile vengono spinte fuori dai suoi confini. Così, in futuro tutte le galassie eccetto la nostra spariranno dalla nostra vista e rimarranno per sempre oltre i limiti della sfera del nostro universo visibile; anche se quest'ultima continuerà a espandersi, non sarà mai abbastanza veloce da tenere il passo con le galassie trascinate via dall'accelerazione dello spazio.

Provate a immaginare che cosa sarebbe successo se la vita ci avesse messo più tempo per evolversi e gli esseri umani avessero iniziato a coltivare l'astronomia solo dopo che tutte le

cose interessanti che oggi vediamo in cielo fossero già state spinte oltre l'orizzonte. La nostra lettura dell'evoluzione dell'universo sarebbe del tutto differente. Il cosmo assomiglierebbe a quell'universo statico in cui credevamo prima che i telescopi fossero in grado di scorgere altre galassie. Così, quello che possiamo conoscere dipende dal momento in cui gli esseri umani sono apparsi nell'universo. Viviamo in un periodo speciale per chi vuole dedicarsi all'astronomia.

In un lontano futuro, fare astronomia non significherà più andare in cima alle montagne e guardare attraverso i telescopi come quello dell'osservatorio Sphinx, ma vorrà dire consultare libri e riviste pieni dei dati registrati dalle precedenti generazioni di astronomi, prima che ciò che avevano osservato venisse spinto al di là del nostro orizzonte cosmico. Forse in futuro l'astronomia sarà una scienza più adatta a un ragazzo della valle del Tamigi che, come me, preferisce le biblioteche di città agli osservatori d'alta quota.

Vale la pena di notare che, in ogni caso, continueremo a vedere le stelle della Via Lattea: a livello locale, infatti, l'attrazione della gravità sarà sufficiente a tenere insieme la galassia. L'espansione dello spazio non basta a portarci via tutte le stelle, ma fa sorgere comunque la domanda su quante cose che avrebbero potuto presentarci un quadro diverso siano già scomparse dalla nostra vista.

Quando siete in macchina e volete accelerare, dovete mettere il piede sul pedale e produrre energia bruciando il carburante. Da dove viene, quindi, il carburante o l'energia che alimenta l'accelerazione dell'universo? E prima o poi non è forse anch'esso destinato a esaurirsi, come quello di un'automobile?

La risposta è che non lo sappiamo. L'aggettivo «oscura», che compare nell'espressione energia oscura, viene usato in cosmologia per indicare qualcosa che non sembra interagire con la luce o altre forme di radiazione elettromagnetica; in altre parole, è qualcosa che non possiamo rilevare. Ci sono diverse congetture su che cosa potrebbe essere questa energia oscura. Una di esse si richiama alla costante cosmologica che

Einstein aveva inserito nelle sue equazioni per tentare di rendere statico l'universo, solo che ora questa costante viene usata per spiegare l'espansione accelerata dello spazio. In genere, penseremmo che l'energia si diffonda attraverso lo spazio mentre viene consumata, o che si diradi con l'espandersi dello spazio; oggi, però, si ritiene che questa energia sia una proprietà dello spazio stesso e che quindi, quando quest'ultimo si espande, non si dirada, ma – al contrario – ne viene creata di più. L'energia oscura è costante in ogni metro cubico di spazio; in altre parole, ha una densità fissa. L'accelerazione è quindi un processo fuori controllo che non può essere fermato. Ciò non è in contraddizione con il principio di conservazione dell'energia, in quanto questa energia oscura è considerata come un'energia negativa controbilanciata dall'incremento nell'energia cinetica che accompagna l'espansione dello spazio.

Se l'espansione dell'universo continua ad accelerare, c'è una sfera con noi al centro dall'esterno della quale non riceveremo mai nessuna informazione. L'informazione viaggia alla velocità della luce. Con un universo statico, ciò significa che, dato un periodo di tempo abbastanza lungo, ogni informazione finirebbe per raggiungerci. Anche con un universo che si espande a una velocità costante, l'informazione – come mostra il mio esempio della formica sull'elastico – arriverebbe infine a noi, pure nel caso di un universo infinito. Con un'espansione accelerata, però, ci sono cose che non potranno mai coprire lo spazio interposto abbastanza in fretta da controbilanciare la sua dilatazione. In base alle nostre attuali stime sul valore della costante cosmologica ipoteticamente responsabile di questa espansione, riteniamo che la sfera dall'esterno della quale non potremo ricevere nessuna informazione partita oggi abbia attualmente un raggio di 18 miliardi di anni luce.

Man mano che lo spazio fra le stelle si espande, la luce da esse proveniente si sposta sempre più verso il rosso, con un allungamento della lunghezza d'onda direttamente proporzionale all'espansione. Le stelle sembreranno quindi spegnersi, perché la lunghezza d'onda della loro luce diventerà talmente lunga che non saremo più in grado di rilevarla. Ciò

riguarderà anche la radiazione di fondo a microonde: la lunghezza d'onda di quei fotoni primordiali si allungherà a tal punto da rendere il loro rilevamento quasi impossibile.

Una conseguenza sorprendente è che, con la radiazione cosmica di fondo talmente spostata verso il rosso da non poter più essere rilevata e con le galassie ormai scomparse dall'orizzonte visibile, i cosmologi del futuro potrebbero non avere più prove del fatto che viviamo in un universo in espansione. Forse le civiltà future ritorneranno al modello di universo diffuso nel mondo antico: la nostra galassia locale circondata dal vuoto, come con l'icosaedro di carta che ho costruito per orientarmi nello spazio. Non ci sarebbe nessun indizio dell'omogeneità dell'universo, e la nostra galassia verrebbe a sembrare un punto eccezionale in mezzo a un universo di nulla.

Impronte cosmiche

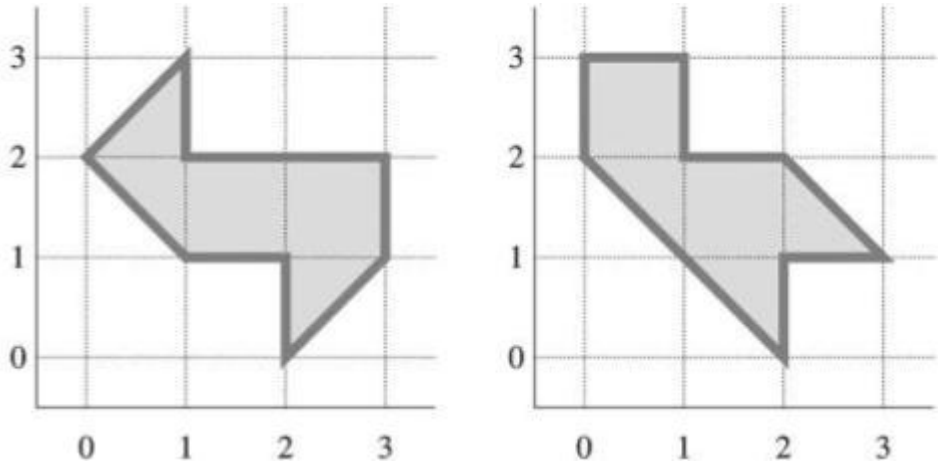
Se l'universo è infinito, sembra molto probabile che non ne avremo mai una conferma; a quanto pare, la struttura dell'universo ci impedirà per sempre di osservare un tale fatto. Tuttavia, è comunque possibile che l'universo oltre il nostro orizzonte visibile lasci qualche sua impronta sullo spazio che possiamo vedere.

Se l'universo è finito, ciò viene a porre dei limiti sulla possibilità di determinate risonanze. Immaginate che l'universo sia una grande cassa di risonanza, come il corpo del mio violoncello. La forma del violoncello è stata scelta per via del piacevole suono creato dalle frequenze di risonanza che possono vibrare all'interno della sua cassa. Di fatto, ciò che distingue uno Stradivari da un violoncello costruito in fabbrica è, almeno in parte, la perfezione della forma, che porta a un suono più bello.

Uno degli interessanti problemi che hanno appassionato i matematici per un certo tempo è questo: è possibile dedurre la forma di una cassa dalle frequenze delle onde che vibrano al suo interno? In un influente articolo, Mark Kak formulò la

domanda: «Potete ascoltare la forma di un tamburo?». Per esempio, un quadrato ha un particolare insieme di frequenze prodotte unicamente da questa determinata forma. Nel 1992, però, i matematici Carolyn Gordon, David Well e Scott Wolpert costruirono due strane forme che, nonostante la loro differenza, avevano identiche frequenze di risonanza.

La cosa interessante, nell'ottica della mia ricerca di un eventuale confine dell'universo, è che le risonanze potrebbero perlomeno essere in grado di dirmi se l'universo è finito o infinito. Se ho una cassa finita, la lunghezza d'onda delle onde che possono risuonare al suo interno è limitata dalla grandezza della cassa stessa; se lo spazio è infinito, invece, non dovrebbe esserci alcun limite. Verso la metà degli anni Novanta, Jean-Pierre Luminet e alcuni suoi colleghi in Francia esplorarono la radiazione di fondo a microonde per vedere quali onde erano rimaste dal Big Bang. Avevano l'impressione che dallo spettro mancassero quelle con lunghezze d'onda lunghe. Forse lo spazio non era grande abbastanza per le onde di quel tipo?



Due tamburi con le stesse frequenze di risonanza.

Nel 2013, i nuovi dati più precisi forniti dal telescopio orbitale Planck hanno però mostrato che non ci sono prove di queste lunghezze d'onda mancanti che avrebbero suggerito la finitezza dell'universo. La giuria, quindi, non si è ancora pronunciata. E questo è uno dei problemi del dilemma: se l'universo è finito, potremmo forse arrivare a scoprirlo; se però è infinito, rimarremo per sempre in uno stato di incertezza epistemologica.

Le onde rilevate nella radiazione di fondo a microonde non ci dicono se l'universo è finito, ma potrebbero comunque consentirci di avanzare una stima sulla sua grandezza minima; di fatto, quindi, le onde da noi rilevabili ci danno una chance di gettare un'occhiata oltre il nostro orizzonte cosmico. Come hanno spiegato gli scienziati sovietici Leonid Griščuk e Jakov Zel'dovič in un articolo pubblicato nel 1978, certe onde possono risuonare solo se la cassa in cui ci troviamo è grande abbastanza. Sulla base delle risonanze che possiamo cogliere, Patricía Castro, Marian Douspis e Pedro Ferreira hanno quindi ipotizzato che l'universo è almeno 3900 volte più grande dello spazio che possiamo vedere.

Un altro modo per dedurre qualcosa sullo spazio oltre i confini del nostro universo visibile consiste nell'assistere a eventi che possono verificarsi solo a causa dell'influenza di cose che si trovano al di là del nostro orizzonte cosmico. Per esempio, ci potrebbe essere qualcosa di grande che attrae le galassie visibili, provocando uno spostamento insolito in alcune regioni del cielo notturno. Pur non essendo in grado di avvistare tali cause, possiamo cogliere sperimentalmente il loro effetto su ciò che vediamo. Quello che possiamo conoscere non si limita a ciò che possiamo vedere. È per questa via che siamo venuti a sapere della materia oscura: il comportamento gravitazionale dell'osservabile ha senso solo se nello spazio c'è più materia di quella che vediamo. Ed è sempre per questa via che abbiamo scoperto Nettuno: anche se alla fine lo abbiamo visto con i nostri occhi, la sua esistenza era stata matematicamente predetta già da prima sulla base dell'effetto che esercitava su ciò che gli stava attorno. Così, anche se non possiamo vedere le cose che si trovano al di là del nostro orizzonte cosmico, è possibile che ci sia qualcosa che, da fuori, esercita un'influenza gravitazionale all'interno della nostra bolla.

Guardando il mio modellino di carta dell'universo che rappresenta questa bolla, resto affascinato dal pensiero di come gli esseri umani siano diventati sempre più piccoli in relazione al tutto. Da quando si sono messi a scrutare il cielo notturno, gli uomini si sono sempre ritrovati a dover correggere la loro percezione della scala delle cose. All'inizio

sembrava che la Terra fosse il centro di tutto. Quindi abbiamo dovuto riaggiustare la nostra posizione nel cosmo dopo aver compreso che al centro c'era il Sole e che la Terra era solo uno dei diversi pianeti che gli orbitavano attorno. Poi, ci siamo resi conto che tutte quelle stelle là fuori potrebbero avere i loro pianeti e che il nostro Sole è confinato ai margini di una galassia di stelle. Infine, abbiamo dovuto ripensare il nostro posto nell'universo facendoci una ragione del fatto che nello spazio ci sono miliardi di altre galassie e che la Via Lattea non ha nulla di speciale.

Suppongo di essermi ormai abituato a questa immensa scala, anche se si tratta di qualcosa di cui è quasi impossibile avere un'autentica comprensione. Tuttavia, le scoperte fatte durante la mia vita – da quando ho accettato il mio posto nell'universo – mi hanno costretto ad allargare un'altra volta i miei orizzonti. Come le precedenti generazioni si sono rese conto che il nostro pianeta era solo uno dei tanti, così sembra che noi, oggi, dobbiamo riconoscere la possibilità che sia lo stesso per il nostro universo. Il primo indizio della verosimile esistenza di ulteriori universi è emerso da un curioso enigma nascosto nei primissimi fotoni che hanno attraversato il nostro universo.

Multiverso

C'è qualcosa di curioso nella radiazione di fondo a microonde. Perché è così uniforme? I fotoni rilevati dai nostri detector hanno tutti una temperatura di 2,725 gradi sopra lo zero assoluto. Quando partirono per il loro viaggio, circa 370.000 anni fa, erano molto più caldi, intorno ai 3000 gradi (la temperatura a cui elettroni e nuclei si amalgamarono per formare gli atomi). Con la progressiva espansione dello spazio, i fotoni si raffreddarono: l'energia in essi contenuta, determinata dalla loro frequenza di vibrazione, diminuì gradualmente, fino a diventare talmente bassa che oggi, nello spettro elettromagnetico, questi fotoni si collocano nella regione delle microonde.

Ma perché hanno tutti quasi esattamente la stessa temperatura? Se due oggetti con temperature differenti sono in contatto l'uno con l'altro, nel corso del tempo la loro energia si trasferirà finché le loro temperature non diventeranno identiche. Questa potrebbe sembrare una buona spiegazione, se non fosse che nella frase precedente c'è una parola importante: contatto. Ora, il contatto non può avvenire a velocità superiori a quella della luce; e, nel nostro caso, la distanza attraverso lo spazio era tale che non c'era il tempo perché l'informazione potesse viaggiare alla velocità della luce per informare il lato opposto dell'universo in espansione su quale fosse la temperatura.

L'unica spiegazione che pareva sensata era quindi la seguente: per raggiungere una temperatura comune, questi due punti nello spazio devono essere stati molto più vicini l'uno all'altro – per un periodo di tempo sufficiente – di quanto il nostro modello dell'espansione dell'universo abbia ipotizzato. Negli anni Ottanta, il cosmologo americano Alan Guth trovò una potenziale soluzione. Nei primi stadi dell'esistenza dell'universo, la sua espansione non fu rapida; fu questa partenza lenta a permettere allo spazio di raggiungere una temperatura uniforme. Quindi, in un periodo oggi chiamato inflazione, lo spazio andò incontro a un'espansione dalla velocità straordinaria. Si ipotizza che a causare questa inflazione sia stato un campo di antigravità chiamato inflatone, che portò a una crescita esponenziale delle dimensioni dell'universo. L'inflazione non durò a lungo: stando all'attuale modello, circa 10^{-36} secondi, ossia un miliardesimo di un miliardesimo di un miliardesimo di un miliardesimo di un secondo. Tuttavia, si ritiene che in quel tempo brevissimo l'inflatone abbia fatto espandere lo spazio di un fattore di 10^{78}: è come se ci fosse stato un improvviso sfogo della pressione accumulata, al termine del quale l'universo passò a un'espansione più tranquilla.

Tale modello contribuisce a spiegare perché l'universo ci appare piatto e, in sostanza, molto omogeneo. Le grandi variazioni che vediamo, come le galassie qui e lo spazio vuoto là, sono di fatto il prodotto di piccole fluttuazioni quantiche nella minuscola porzione di spazio poi gonfiata da questa

massiccia inflazione. Quest'ultima, inoltre, chiarirebbe anche perché l'universo appare così piatto: in pratica avrebbe stirato ogni curvatura rilevabile eventualmente presente nell'universo primordiale.

La matematica sviluppata per spiegare questa inflazione – da Andrej Linde a Stanford e Alexander Vilenkin alla Tufts – fa una predizione straordinaria: essa non sarebbe solo un singolo evento capitato una volta, ma anche oggi, in altre regioni, lo spazio potrebbe gonfiarsi come ha fatto nel nostro universo. Le fluttuazioni quantistiche nello spazio fanno sì che in certi posti emerga il campo dell'inflatone, creando vasti universi. In altri termini, là fuori potrebbero esserci altri universi come il nostro, così che lo spazio potrebbe di fatto assomigliare a una forma di groviera (dove i buchi corrisponderebbero ai vari universi).

Potremo mai sapere se questa descrizione dell'universo è corretta? Non ci stiamo forse limitando a costruire teorie in sé coerenti che, pur essendo verosimili, restano comunque inverificabili? Sembra che persino all'interno del nostro stesso universo ci sia un limite oltre il quale non possiamo vedere: come possiamo sperare, quindi, di scoprire se questi universi sono reali oppure sono soltanto il frutto della fantasia dei fisici teorici?

Le indagini sull'esistenza di questi ulteriori universi si sono concentrate sulla possibilità che vengano a interagire con il nostro in modo tale da lasciare una qualche sorta di impronta. La radiazione cosmica di fondo potrebbe fornirci la prova che il nostro universo, durante la sua formazione, si è scontrato con altri universi? Qualcuno ha ipotizzato che le differenze di temperatura nella mappa dell'universo primordiale potrebbero essere un risultato di tali collisioni, ma, come riconosce uno dei team dell'UCL che studiano queste possibilità, «uno dei molti dilemmi a cui i fisici si trovano davanti è che gli uomini sono bravissimi a scegliere selettivamente, tra i dati, degli schemi che potrebbero essere soltanto coincidenze». Tuttavia, non si tratta di un'impresa disperata. Trovare le prove dell'esistenza di ulteriori universi non trascende a priori le nostre possibilità. Potremmo riuscirci. La sfida è di capire in

quali modi questi ulteriori universi potrebbero influenzare ciò che si trova entro il nostro orizzonte cosmico.

Altri universi, altre costanti

Una conseguenza intrigante di questi universi potenzialmente inconoscibili è che potrebbero spiegare una delle ragioni principali per cui viene postulata l'esistenza di un Dio. Il multiverso, infatti, potrebbe costituire la migliore soluzione finora trovata alla problematica sensazione che il nostro universo debba essere stato progettato da qualcuno.

Non sto parlando dell'illusione che la vita sia il frutto di un progetto biologico, illusione che nasce dalla nostra incapacità di inquadrare nella giusta prospettiva l'immensità del tempo e la casualità. Grazie alla teoria darwiniana dell'evoluzione, non abbiamo bisogno di un progettista: i meccanismi interni del nostro universo sono sufficienti a produrre le magnifiche strutture che osserviamo sul nostro pianeta.

Darwin ha fatto un eccellente lavoro eliminando la necessità di un progettista soprannaturale per spiegare la complessità della vita che ci circonda: non serve un Dio per rendere ragione di queste cose quando basta un meccanismo semplice come l'evoluzione darwiniana. Tuttavia, quello che ancora ci manca è una buona spiegazione per le costanti della natura – quella ventina di numeri come la massa di un elettrone, la costante gravitazionale, la velocità della luce, la carica di un protone – che paiono regolate alla perfezione in modo che la vita possa emergere e conservarsi. Anche se abbiamo un meccanismo per spiegare la biologia, non ne abbiamo ancora uno simile in grado di spiegare la fisica.

Sembra che non ci siano chiare ragioni per cui tali costanti debbano assumere proprio questi particolari valori. Perché non potrebbero sintonizzarsi su altri? La cosa che colpisce di più è vedere come la possibilità della vita nel nostro universo sia sensibile ai più piccoli cambiamenti nel valore di queste costanti. Per esempio, se la costante che controlla il comportamento del campo elettromagnetico cambiasse del 4

per cento, la fusione nelle stelle non sarebbe più in grado di produrre carbonio e ogni forma di vita nell'universo dovrebbe di conseguenza basarsi su altri atomi. Alcune delle altre costanti sono altrettanto sensibili alle minime variazioni: un cambiamento nella 123ª cifra decimale della costante cosmologica basterebbe a farci dire addio alla possibilità di avere delle galassie abitabili.

Questo è uno dei motivi per cui l'ignoto che sta oltre il nostro orizzonte cosmico potrebbe, con i suoi molteplici universi, offrire una soluzione al dilemma. Nel modello del multiverso, infatti, ci sono un sacco di universi differenti, in ciascuno dei quali il valore delle costanti fondamentali potrebbe essere assegnato casualmente. Nella maggior parte dei casi, un universo non potrà svilupparsi molto, in quanto le sue costanti non sono favorevoli all'azione; in alcuni, però, le costanti sono tarate proprio perché gli atomi possano formarsi e dare infine origine alla vita. Com'è ovvio, se oggi siamo qui a osservare questo universo, significa che dobbiamo trovarci in uno degli universi speciali: è il cosiddetto principio antropico.

Penso che la maggior parte degli scienziati speri di ottenere una risposta più soddisfacente sul motivo per cui il nostro universo è così, una risposta in grado di mostrarci che le costanti in realtà non sono casuali e che le cose dovevano stare proprio in questo modo. Affidarsi al multiverso sembra un po' una scappatoia, come se non ci stessimo impegnando abbastanza e volessimo riempire il vuoto con qualcosa che, probabilmente, non saremo mai in grado di conoscere.

Forse, però, le cose stanno proprio così, e dobbiamo ingoiare il rospo e accettare il modello del multiverso. La Terra, per esempio, è solo un pianeta che, per caso, si è ritrovato in un posto dove ci sono le condizioni ideali per la vita. Non potremo mai scoprire una ragione che mostri perché abbia dovuto trovarsi lì: molti pianeti non hanno avuto questa fortuna, ed è solo un caso che il nostro ce l'abbia fatta. Se sono riuscito ad accettare una spiegazione multiplanetaria per la vita, perché dovrei farmi problemi a ricorrere al multiverso per spiegare la fisica?

La mia speranza è che possiamo capire perché l'universo dev'essere proprio così senza richiamarci all'idea del multiverso. In ultima analisi, potrebbe esserci una ragione per cui questo universo in apparenza così speciale è in realtà il più naturale. Sarebbe la risposta preferita da gran parte degli scienziati. Una bolla stabile è una sfera perfetta. Ci sono molte altre forme tridimensionali che la bolla avrebbe potuto assumere: perché, dunque, proprio questa perfezione? Lo sappiamo: la matematica ci spiega che, fra tutte le possibili forme, la sfera è quella che risponde meglio al criterio di minimizzazione dell'energia. Oggi cerchiamo una spiegazione analoga sul perché il nostro universo potrebbe essere scientificamente favorito, proprio come la sfera.

È tuttavia probabile che l'universo non sia come una bolla. Forse è più simile a quando mettiamo una matita in equilibrio sulla sua punta e poi togliamo il dito. La matita potrebbe cadere in infinite direzioni, e nessuna è favorita. Il caso (incarnato in una fluttuazione quantistica) determinerà quale direzione e quale universo verranno scelti.

Qualcuno afferma che c'è un'alternativa: un'intelligenza trascendente regolerebbe con precisione il tutto. Questa risposta, però, sembra proprio una scappatoia. Perché il multiverso è una risposta scientificamente più soddisfacente? Questa teoria, sia pure in un modo un po' strano, possiede quel senso di economia necessario in una buona teoria. Potreste obiettare che sembra a dir poco bizzarro che una teoria richieda molteplici universi, ma è l'economia sul piano esplicativo a renderla affascinante: la spiegazione termina e non c'è bisogno di aggiungerne altre. Questi ulteriori universi sono solo altri universi come il nostro con delle variazioni: non c'è nulla di realmente nuovo, ma una volta inglobati tutti questi universi nella nostra teoria otteniamo una soluzione completa al problema della regolazione precisa delle costanti. L'idea che tali costanti siano state regolate da un progettista solleva più domande di quelle a cui risponde.

Indovinate il prossimo numero

Una buona teoria scientifica dovrebbe essere un'ipotesi economica che ci fa capire come tutte le cose stanno insieme, senza farci sentire il bisogno di introdurre troppi altri elementi per poter seguire la storia. La teoria del multiverso ha una semplicità e una naturalezza che la rendono un candidato forte. La fisica dell'inflazione ci offre un possibile meccanismo per produrre gli ulteriori universi; pertanto, non si tratta di un'ipotesi campata in aria. Tuttavia, dobbiamo stare attenti quando usiamo le qualità della semplicità e dell'economia come criteri per giudicare la possibile verità di una teoria.

Se vi chiedessi qual è il prossimo numero nella sequenza

1, 2, 4, 8, 16, …

la risposta più scontata sarebbe 32. La maggior parte delle persone riterrebbe che la chiave della sequenza consiste nel raddoppio di ogni numero precedente. E se qualcuno vi dicesse che il numero successivo è 31? Probabilmente, vi mettereste a ridere. Ma quando capite che questi numeri potrebbero anche indicare in quanti modi è possibile dividere un cerchio, sia 31 sia 32 diventano risposte legittime. Così, potreste chiedere qualche dato sperimentale in più che vi aiuti a decidere quale sia la spiegazione migliore.

▶ *Perché 31 è il numero successivo…*

Segnate *n* punti sul perimetro di un cerchio e tracciate quindi le linee che congiungono ognuno di essi agli altri. In quante regioni avete diviso la superficie del cerchio? Il numero massimo di regioni che ottenete, partendo da un singolo punto, è indicato dalla sequenza 1, 2, 4, 8, 16. Con il sesto punto, però, arriva una sorpresa: il numero massimo di regioni ottenute è 31. ◀

Il punto interessante è che, per quanti dati scopriate, potrò sempre presentarvi un'equazione in grado di fornirvi una ragione coerente per cui un qualunque altro numero potrebbe essere il prossimo. Così, disponendo di una qualunque quantità finita di dati, sembra che non potremo mai realmente sapere quale sia la loro spiegazione senza avere ulteriori dati con cui testare la nostra equazione. Si tratta del modello di scienza proposto dal filosofo Karl Popper: una teoria può solo essere falsificata, mai verificata.

Nel giudicare una buona teoria, spesso gli scienziati fanno appello a una certa misura di naturalezza, una sorta di rasoio di

Ockham che favorisce un'equazione rispetto a un'altra. Quanto più è semplice il grado dell'equazione, tanto minori saranno i dati da inserire per ottenere una risposta, cosa che viene in genere a rivestire un'importanza significativa quando si tratta di decidere quale spiegazione preferire. È per questo motivo che la maggioranza delle persone sceglierebbe il raddoppio come la spiegazione più evidente per la sequenza di numeri riportata sopra, preferendola all'equazione di quarto grado che ci dà i numeri delle possibili divisioni di un cerchio.

Così, quando ci troviamo di fronte a due teorie in competizione e non c'è nessun modo di dire quale sia quella corretta, sembra che preferiamo la teoria più semplice. Questo concetto trova espressione in ciò che i filosofi chiamano l'inferenza alla spiegazione migliore, o la teoria dell'abduzione. Tuttavia, non c'è nessuna ragione per pensare che la semplicità sia garanzia di verità.

Perché la semplicità, l'economia o la bellezza costituiscono un buon criterio per giudicare se siamo più vicini alla verità? Entro certi limiti, ciò è confermato dall'esperienza. La nostra associazione della bellezza con la verità nasce dal fatto che l'evoluzione ci ha programmati per rispondere con una scarica di dopamina quando pensiamo di aver trovato un'idea che può aiutarci a muoverci nel nostro ambiente. Così, diciamo che una cosa è bella perché questa è la risposta del nostro corpo a qualcosa che sarà vantaggioso per la nostra sopravvivenza evolutiva.

Che cosa succede quando vengono proposte delle teorie alternative? Come vi comportate con chi crede che l'universo abbia 5775 anni? Gli mostrate i reperti fossili, ma lui ribatte che l'universo è stato creato vecchio. Si è costruito una spiegazione che è in sé coerente e ha una propria logica, ma che alla mia mente suona altamente improbabile. È difficile discutere con qualcuno che sostiene una teoria che non può essere testata.

Oggi ci troviamo sempre più spinti verso spiegazioni scientifiche dell'evoluzione dell'universo che potrebbero essere impossibili da testare. Se qualcuno formula una teoria che predice nuove particelle senza però specificare a quale

energia possono essere rilevate, nessuna prova potrà mai convincerlo che si sbaglia: ribatterà sempre che l'ipotetica particella esiste nella regione che non siete ancora stati in grado di controllare.

Qualcuno ha affermato che l'attuale impossibilità di testare la teoria del multiverso la rende una semplice ipotesi fantasiosa, al pari di quella di chi parla di un progettista soprannaturale che ha regolato ogni cosa. Tuttavia, anche se al momento non ci sono modi di sottoporre a un controllo empirico la teoria del multiverso, non c'è nessuna ragione per credere a priori che rimarrà per sempre incontrollabile. Lo stesso vale per la teoria delle stringhe, che spesso non viene considerata come una teoria scientifica perché non fa predizioni suscettibili di controllo; questo, tuttavia, non è un valido motivo per gettarla alle ortiche, in quanto non è detto che rimanga incontrollabile per sempre.

Come abbiamo già affermato, la teoria del multiverso porta con sé un meccanismo, l'inflazione, per spiegare la formazione dei molteplici universi. E, se non altro, abbiamo la prova che almeno uno di questi esiste: il nostro. Uno dei criteri per stabilire la scientificità di una teoria è che dovrebbe fornire spiegazioni basate su cose naturali, non soprannaturali. Quando volete introdurre qualcosa di nuovo, che sia l'energia oscura o la gravità, dovete incorporarlo nel mondo naturale. E come? Mostrando come il suo comportamento influisce sul resto delle cose visibili attorno a noi.

Un altro criterio per la buona scienza è che si possano fare esperimenti per mettere alla prova la teoria. Uno dei problemi della cosmologia, però, è che il suo oggetto è un esperimento unico e irripetibile: è alquanto difficile riprodurre un Big Bang e vedere che cosa succede questa volta. Detto questo, possiamo comunque testare le condizioni del Big Bang in piccola scala sulla Terra per farci un'idea della fisica di quell'evento cosmologico. Tuttavia, dato che dovremmo comunque lavorare all'interno della fisica emersa con il Big Bang, è difficile vedere come potremmo testare la possibilità dell'emergere di altre teorie fisiche con costanti fondamentali differenti – o, addirittura, di fisiche differenti – da diversi momenti della creazione dell'universo.

Esclusi gli esperimenti, uno dei cardini della cosmologia è il concetto di omogeneità: dobbiamo lavorare presupponendo che ciò che accade nella nostra regione dell'universo sia rappresentativo della sua struttura globale. Altrimenti, sarebbe tutto concesso. Ipotizziamo quindi che la curvatura dello spazio vicino a noi sia la stessa che si registra ovunque, pur senza avere la garanzia che le cose stiano di fatto così: come abbiamo già detto, una persona che vivesse sulla parte piatta di un pianeta a forma di semisfera sarebbe portata a pensare che l'intero pianeta è piatto finché non raggiunge il punto dove la curvatura cambia.

Senza supporre l'omogeneità, come possiamo escludere la possibilità che oltre il nostro orizzonte avvenga qualcosa di totalmente diverso? Forse qualcuno ha scaricato il nostro universo da un sito web e l'ha incollato insieme come la mia sfera celeste. Forse siamo solo la casa delle bambole di un qualche essere soprannaturale (cioè che esiste al di fuori del nostro universo). Se questo essere soprannaturale non gioca mai con la casa delle bambole, non vedo come potremmo arrivare a conoscere qualcosa in proposito. Del resto, però, se non ha alcuna influenza, si tratta di un'invenzione ben strana: che bisogno c'è di lasciare la nostra immaginazione correre a briglia sciolta? Se invece questo essere soprannaturale si mette a giocare con la casa delle bambole e c'è un'interazione, allora possiamo testare l'idea di trovarci di fronte a qualcosa di potenzialmente conoscibile.

C'è qualcuno là fuori?

È sorprendente vedere quanto spesso, nel corso della storia, il cammino della cosmologia e quello della religione siano venuti a incrociarsi. Il problema di che cosa potrebbe esserci oltre i confini dell'universo ha sempre affascinato tanto gli scienziati quanto i teologi. Per il filosofo medievale d'Oresme, era lì che si nascondeva Dio. La maggior parte delle religioni hanno un mito della creazione del cosmo. Per gli aborigeni australiani, tutto è scaturito dal ventre del Serpente Arcobaleno. Per gli scienziati, è stato il Big Bang. Galileo

ebbe problemi con la Chiesa cattolica avendo sfidato il pensiero dominante riguardo al nostro posto nel cosmo. Tuttavia, fu proprio un prete cattolico, Lemaître, a formulare l'odierna teoria scientifica su come il nostro cosmo è emerso dal Big Bang.

Anche nella nostra epoca, la cosmologia e la religione continuano a incrociarsi, a volte in modo polemico. Nel 1972, Sir John Templeton, un imprenditore britannico di origini americane, istituì un premio (che porta il suo nome) per il «progresso nella religione» che, col tempo, si è evoluto fino a diventare un premio per il «progresso verso la ricerca o le scoperte riguardanti le realtà spirituali». Si tratta di una grossa somma di denaro che oggi ammonta a 1.200.000 sterline; Templeton stabilì che il valore del suo premio avrebbe dovuto superare quello del premio Nobel, che, a parer suo, trascurava ingiustamente la dimensione spirituale.

Il premio Templeton è stato assegnato ad alcuni nomi scontati: il primo è andato a Madre Teresa, dopodiché sono stati premiati diversi preti, predicatori evangelici, rabbini e anche il Dalai Lama. Negli ultimi anni, però, è stato dato a un crescente numero di scienziati, sempre quelli che svolgono le loro ricerche nel campo della cosmologia e delle grandi domande sull'universo.

Numerosi scienziati di spicco hanno tuttavia criticato i loro colleghi che hanno accettato il premio, ritenendo che ciò equivalga a sottoscrivere un approccio religioso ai problemi scientifici. Fra questi critici c'è anche il mio predecessore Richard Dawkins, secondo cui il premio viene in genere assegnato «a uno scienziato disposto a dire qualcosa di bello sulla religione». Il fisico Sean Carrol ha scritto le ragioni per cui ha rifiutato il finanziamento offerto dalla Fondazione Templeton per le sue ricerche: «Non è una questione di compromessi etici; è, semplicemente, una questione di dare un messaggio sbagliato. Ogni volta che uno scienziato serio prende dei soldi dalla Templeton, contribuisce – sia pure solo in modo implicito – a prestare la sua credibilità all'idea secondo cui la scienza e la religione sono solo due strade differenti che conducono alla stessa verità ultima».

Volevo parlare con un cosmologo che aveva accettato il premio. Il professor John Barrow, del dipartimento di Matematica applicata e fisica teorica dell'Università di Cambridge, lo ha ricevuto nel 2006. La sua risposta alla mia e-mail andava dritta al cuore del motivo per cui la cosmologia in particolare ha implicazioni per quanto riguarda il mio concetto di Dio inteso come quelle cose che non possiamo conoscere: «La maggior parte delle domande fondamentali della cosmologia non può avere risposta. Parlerò proprio di alcune di esse in una lezione che terrò questo sabato».

Perfetto: era l'occasione di sentire quanto è esteso, secondo i cosmologi, il campo delle cose che non possono conoscere. Seduto in prima fila, mentre Barrow passava da un problema all'altro, ho iniziato a rendermi conto di quanto poche siano probabilmente le cose che verremo mai a sapere sull'universo. Servendosi delle immancabili figure con cui gli astronomi infarciscono le loro presentazioni, Barrow nel suo intervento ha confermato tutte le paure che avevo accumulato riguardo all'esiguità di ciò che possiamo conoscere sul nostro universo.

Il Big Bang: «In un certo momento del passato, l'universo sembra aver avuto un inizio: un momento in cui la densità e la temperatura erano infinite. Non sappiamo se quell'inizio sia stato reale».

La grandezza dell'universo: «Al di là del nostro orizzonte c'è senza dubbio parecchio universo, ma noi non l'abbiamo mai visto, né mai vedremo quasi tutta questa parte nascosta. Così, quando la gente chiede se l'universo abbia avuto un inizio, o se sia finito o infinito, dobbiamo tener presente di non poter mai rispondere a domande relative all'intero universo».

Al termine della lezione, quando sono andato a parlare con Barrow e l'ho provocato riguardo all'assegnazione del premio Templeton a scienziati come lui, mi ha spiegato il motivo per cui pensava che la Fondazione stesse finanziando e premiando i cosmologi. «Sir John Templeton amava la scienza perché c'era progresso. Credeva che la cosmologia si stesse occupando di questioni serie e importanti, cose che chiunque, a prescindere dal suo campo di lavoro – che fosse la filosofia, o la religione, o la teologia – avrebbe dovuto conoscere. Non

si possono studiare quelle materie ignorando ciò che avviene nel resto della scienza.»

Barrow ritiene che nel dibattito scienza-religione andrebbero fatte molte più distinzioni. «Una delle lezioni che le persone interessate al rapporto scienza-religione devono imparare è che dobbiamo dire quale scienza intendiamo, perché il rapporto varia profondamente a seconda dei casi.

«La cosmologia e la fisica fondamentale ci portano in contatto con queste grandi domande per le quali sappiamo che non otterremo una risposta. Chi lavora in questi campi è abituato all'incertezza, a non sapere e, entro certi limiti, a vedere le ragioni per cui non sappiamo. Le persone che si dedicano alla fisica di laboratorio o alla biologia, come Dawkins, non sono invece abituate a quel genere di situazioni. Pensano che ogni problema sia risolvibile scomponendolo e analizzandolo.»

Barrow non stava comunque sminuendo il loro lavoro: «La gente pensa sempre che lo studio dell'universo debba essere il problema più difficile. Nient'affatto: comprendere il cervello, per esempio, è molto più difficile, molto più complicato. In cosmologia le cose avvengono molto lentamente, ci si può avvicinare alla comprensione usando buone approssimazioni. Si può prendere una semplice soluzione simmetrica per poi iterarla. Con la società umana, questo è impossibile. Non c'è nessun modello semplice.»

Barrow è però convinto che la scienza a cui lui si dedica abbia una qualità distintiva: «Nella fisica fondamentale e in cosmologia, sappiamo che ci sono dei problemi che non saremo in grado di risolvere. Perché, innanzitutto, esistono leggi di natura? C'è poi la questione del numero delle dimensioni dello spazio e del tempo. O il problema se esista o meno un multiverso. C'è stata una singolarità all'inizio di tutto? L'universo è infinito? Possiamo pensare molte domande che resteranno senza risposta. Questo ci porta a vedere le cose in un modo differente».

Barrow ha ricevuto il premio Templeton per il suo lavoro che ha evidenziato i limiti intrinseci della conoscenza scientifica. C'è una crescente tendenza a pensare che, alla fine,

la scienza sarà in grado di riempire tutti i buchi, e Barrow vuole tenere a freno questa fede nella capacità della scienza di conoscere tutto.

«L'universo non è costruito per venire incontro ai nostri comodi. Non è un esercizio di filosofia della scienza. È un peccato non riuscire ad accorgersi di queste cose. Di fatto, se tutte queste domande fondamentali dovessero trovare una risposta in ciò che stiamo facendo, sarei molto sospettoso: mi sembrerebbe qualcosa di anti copernicano. Quindi, ritengo che il fatto che non possiamo risolvere certi problemi, o che non possiamo ottenere i dati necessari, sia un aspetto copernicano delle cose.»

I cigni neri, i pregiudizi e le risposte in fondo libro

Barrow ritiene che dobbiamo riconoscere quanto la nostra visione dell'universo sia straordinariamente parziale: «La maggior parte dell'astronomia si basa sull'osservazione di cose che brillano nel buio: le stelle nelle galassie remote, la cosiddetta materia luminosa. Solo il 5 per cento dell'universo è composto di quella materia ordinaria da cui siamo fatti noi e le stelle luminose. La materia luminosa ci dà un quadro alquanto parziale della situazione: parla dei luoghi dell'universo dove la densità diventa tale da permettere l'innesco delle reazioni nucleari che producono la luminosità».

Sotto certi aspetti, questo vale per l'intera scienza. La nostra visione dell'universo è segnata da un pregiudizio in favore delle parti che hanno un impatto sui nostri sensi; le cose che non ce l'hanno non vengono neppure notate.

«Se viveste su un pianeta perennemente coperto dalle nubi – il pianeta Manchester, diciamo – non ci sarebbe l'astronomia. D'altro canto, però, imparereste un sacco di cose sulla meteorologia.»

Nella visione di Barrow, la cosmologia ha un carattere molto diverso rispetto ad altre scienze come la fisica o le

scienze umane, e proprio questa potrebbe essere la chiave del suo stretto rapporto con la teologia.

«Una delle cose che differenziano i cosmologi è che gli scienziati sono abituati a fare esperimenti, a testare le teorie. Sull'universo, però, non si possono fare esperimenti. Bisogna prenderlo così com'è.»

Molti scienziati contemporanei hanno sottoscritto la filosofia di Karl Popper secondo la quale non è mai possibile dimostrare che una teoria scientifica è corretta: il massimo che possiamo fare è cercare di falsificarla. «Tutti i cigni sono bianchi» è una teoria che non potremo mai dimostrare: il meglio che possiamo fare è falsificarla scoprendo un cigno nero. Nella filosofia di Popper, tutto ciò che non può essere falsificato non è scientifico. Di conseguenza, se in cosmologia non si possono fare esperimenti, gran parte di essa va considerata come non scientifica? Barrow non si sarebbe arreso tanto facilmente.

«La filosofia della scienza di Popper è incredibilmente ingenua. In astronomia non funziona, perché quando facciamo le nostre osservazioni non sappiamo se sono state effettuate in modo corretto. Così, la nostra predizione potrebbe essere stata falsificata soltanto perché nell'esperimento qualcosa è stato fatto male; o, cosa più probabile, perché una qualche forma di pregiudizio ha inficiato la raccolta dei dati.»

I cigni neri sembrano segnare la condanna definitiva per una teoria secondo la quale tutti i cigni sono bianchi, ma in altri contesti più sottili potrebbe essere molto meno chiaro se l'errore sta nella teoria o nelle osservazioni, il che significa che la teoria non andrebbe scartata troppo in fretta. Magari il cigno si era rotolato nella polvere di carbone subito prima di essere osservato.

Barrow crede che anche in cosmologia potrebbero esserci momenti in cui si scopre un cigno nero.

«Il punto di riferimento chiave in tutte queste domande ultime che potrebbe davvero cambiare le cose, in un modo impossibile da raggiungere fermandoci solo alle nostre riflessioni, sarebbe prendere contatto con una civiltà

extraterrestre avanzata evolutasi in modo indipendente e vedere che cosa sono giunti a pensare a proposito di questi interrogativi. Hanno trovato utili i nostri stessi concetti matematici? Hanno fatto fisica come noi? Definiscono le costanti fondamentali in modi a noi comprensibili? Che cosa pensano di queste domande ultime? Ora, questo sarebbe un punto di riferimento di importanza insuperabile, la ragione principale per prendere contatto con gli extraterrestri.»

Considerando le risposte che questa civiltà avanzata potrebbe aver trovato riguardo alle grandi domande, mi aspetterei che Barrow sia entusiasta di fronte alla possibilità di un contatto. La sua risposta invece mi sorprende.

«Dal punto di vista scientifico sarebbe un disastro. Se entrassimo in contatto con una civiltà molto avanzata in possesso delle risposte a tutte le domande che ci siamo mai posti, per noi i giochi sarebbero chiusi. Non avremmo più alcuna ragione di fare scienza. Sarebbe come guardare in fondo al libro e trovare tutte le risposte.»

E non vorrebbe?

«Penso che sarebbe un disastro.»

Come la fisica delle particelle Melissa Franklin, nel Secondo Confine, non voleva premere il bottone che le avrebbe elargito una conoscenza completa, nemmeno a Barrow piace l'idea di guardare le risposte in fondo al libro. A differenza della Franklin, però, egli è convinto che ci siano domande alle quali neppure la civiltà più avanzata sarà mai in grado di rispondere. Quelle pagine in fondo al libro resteranno per sempre in bianco.

«La brutta notizia è che in cosmologia ci sono degli inconoscibili che non conosciamo come tali: cose che non arriveremo mai a conoscere, benché sospettiamo di poter sapere della loro esistenza.»

Fare delle scelte

Molte persone concorderebbero nel ritenere che, di fronte a una questione inconoscibile, bisognerebbe rimanere agnostici; così, ero interessato alla posizione di Barrow riguardo al problema di Dio. Era un agnostico? Un ateo?

«Cristiano, in realtà.»

Non me l'aspettavo. Lo avevo sentito parlare diverse volte e avevo letto molti dei suoi libri ma, a differenza di Polkinghorne, non faceva mostra della sua fede (Polkinghorne, dal canto suo, la rendeva subito evidente indossando un collare da prete). Ma immagino che anch'io abbia fatto una scelta dichiarandomi ateo. Non credo che l'unica risposta logica a una questione irrisolvibile consista nel non prendere posizione.

La nostra fede in una possibile risposta a una questione inconoscibile può avere un impatto sulla nostra condotta. Prendete, per esempio, il problema se l'universo sia infinito. Potrebbe essere, a tutti gli effetti, una domanda a cui non saremo mai in grado di rispondere; dovremmo quindi rimanere agnostici riguardo a questo punto?

C'è un ragionamento secondo cui sarebbe saggio, da parte nostra, richiamarci a questo proposito alla scommessa di Pascal. Se l'universo è infinito (probabilmente) non lo saprete mai; se invece è finito, è possibile che lo scopriate. Pertanto, la migliore strategia non è forse quella di scegliere di credere che l'universo sia finito? Alla fine, se è infinito, nessuno potrà mai dimostrare che avete torto, mentre se è finito, magari potrete dimostrare di avere ragione.

E se poi un universo infinito vi offrisse una cornice più eccitante dentro cui vivere la vostra vita? Un universo infinito ha alcune implicazioni interessanti, per esempio c'è un numero infinito di copie di voi che stanno leggendo questo libro. L'impatto psicologico di una simile conclusione a valle della vostra fede in un universo infinito potrebbe avere un effetto drammatico sul modo in cui attraversate la vostra esistenza.

▶ *Perché può esserci un numero infinito di vostre copie che stanno leggendo questo libro*

Dipende da un paio di supposizioni. La prima viene dalla fisica quantistica: vale a dire, che nell'universo tutto è quantizzato. Ciò significa che, in una regione finita dello spazio, ci sono solo un numero finito di punti, che possono assumere solo un numero finito di differenti valori.

Una versione semplificata di questo universo assomiglia a una scacchiera infinita in cui ogni casella può solo essere bianca o nera. Prendete una regione di questa scacchiera che venga a rappresentare la complessità della vita, inclusi voi che leggete questo libro. Supponiamo, per esempio, che sia una regione di 10 × 10 caselle, con una particolare configurazione di caselle bianche e nere.

Un modello dell'intero universo infinito è quello in cui, all'esterno di questa regione di 10 × 10, ogni altra casella è colorata di nero, più o meno come il vuoto cosmico. Ci serve quindi un'altra supposizione, quella secondo cui ogni possibile configurazione ha le stesse probabilità di verificarsi, nessuna è favorita rispetto alle altre. Dato che il numero delle possibili configurazioni è finito e le regioni di 10 × 10 caselle nell'universo sono infinite, se la nostra configurazione ricorresse solo un numero finito di volte ce ne dovrebbe essere un'altra con un numero infinito di ricorrenze, che sarebbe quindi infinitamente più probabile; e questo contraddice la nostra seconda ipotesi. Vale a dire che la nostra configurazione deve ripetersi all'infinito nell'universo a scacchiera. ◀

Penso che sia questo il motivo per cui respingo la scommessa originale di Pascal, relativa alla questione dell'esistenza di Dio (nel senso convenzionale dell'esistenza di un'intelligenza soprannaturale creatrice dell'universo), e scelgo di dichiararmi ateo. In ultima analisi, ciò influisce sul modo in cui conduco la mia vita. Non sto negando che è un problema di cui forse non conoscerò mai la risposta, ma se ammettessi questo genere di salti dell'immaginazione nella realtà della mia vita si aprirebbero troppe altre possibilità stravaganti, il che va contro la mia naturale predisposizione a cercare ragionando la spiegazione migliore. Credere nel multiverso significa solo creare molte altre copie di una stessa cosa, ma con delle variazioni; forse non sarà la spiegazione perfetta, ma la ritengo una spiegazione migliore.

Potremo mai sapere che non possiamo conoscere qualcosa?

Dopo aver lasciato Barrow nel suo ufficio, mi sentivo un po' giù. So che ero alla ricerca delle cose che non possiamo conoscere, ma stavo ormai iniziando a chiedermi se possiamo conoscere qualcosa. Rincasando, una frase tratta da uno dei libri di Barrow mi ha spinto a riflettere: «L'idea dell'impossibile fa suonare un campanello di allarme nella

mente di molti. Per qualcuno, ogni richiamo al fatto che potrebbero esserci dei limiti alla portata della comprensione umana dell'universo o al progresso scientifico è un'idea pericolosa che viene a minare la fiducia nell'impresa scientifica».

Riguardando i Confini fin qui presi in esame, non c'è nulla che sembri irrisolvibile come il problema se l'universo sia o meno infinito. La teoria del caos mi ha detto che il futuro è inconoscibile, ma posso limitarmi ad aspettare che diventi presente e allora potrò conoscerlo. Dividendo il mio dado, potrei anche raggiungere un punto dove lo spazio è quantizzato, ed è pertanto possibile che ci sia solo un numero finito di passi prima di arrivare all'indivisibile; è vero che potrebbe essere quasi impossibile percorrere di fatto questa discesa, ma non si tratta comunque di una sfida da considerare a priori insolubile. E il principio di indeterminazione di Heisenberg non ci sfida tanto a dare una risposta quanto, piuttosto, a considerare se le domande sono ben poste. Non è che non possiamo conoscere simultaneamente la posizione e la quantità di moto, è che non ha senso porsi questa domanda: ecco la rivelazione.

La questione di un universo infinito non sembra però una domanda malposta. L'universo è infinito oppure no. Se lo è, è davvero una sfida immaginare un modo in cui potremmo arrivare a scoprirlo, dato che c'è un orizzonte cosmico oltre il quale non possiamo conoscere nulla.

Poi, però, ho avuto un'illuminazione. Forse la questione di un universo infinito non è inconoscibile come si potrebbe pensare. Non ci potrebbero essere modi indiretti per giungere alla conclusione che l'universo è infinito? La risposta potrebbe trovarsi nel mio campo di studio: la matematica, infatti, si è già dimostrata un potente telescopio attraverso il quale guardare l'universo. E se le attuali leggi della fisica portassero a una contraddizione matematica sotto l'ipotesi che l'universo è finito? Ciò ci costringerebbe a concludere che l'universo dev'essere infinito, oppure che le nostre leggi della fisica sono sbagliate. In fin dei conti, è in questo modo che abbiamo scoperto i numeri irrazionali (ossia quei numeri la cui espansione decimale prosegue all'infinito senza mai ripetersi).

Ecco la forza della matematica: conoscere l'infinito tramite il nostro cervello finito. I pitagorici mostrarono che la lunghezza della diagonale di un quadrato unitario è data da un numero che non può essere scritto come un semplice rapporto di numeri interi; questa lunghezza, quindi, può esistere solo se ci sono dei numeri che possono essere catturati soltanto da un'espansione decimale infinita e non periodica. Magari usando lo stesso strumento che ci ha aiutato a scoprire i numeri irrazionali – la prova per assurdo – potremo un giorno dimostrare l'esistenza di un universo infinito.

Forse la vera lezione è che «ciò che non possiamo conoscere» è una cosa che non potremo mai sapere, proprio perché è difficilissimo escludere la possibilità di nuove idee che potrebbero ricondurre ciò che è ignoto nel regno di ciò che è noto (come nel caso di Comte e della scoperta della materia di cui sono fatte le stelle).

Anche se l'universo che saremo in grado di vedere o esplorare è finito come il modello di carta che tengo sulla scrivania, forse il messaggio è che non dovremmo cedere troppo presto al richiamo dell'inconoscibile. I telescopi matematici della mente potrebbero un giorno consentirci di oltrepassare questi confini di carta e scoprire che, in realtà, la nostra sfera è collocata in una distesa infinita di spazio.

Quinto Confine: l’orologio da polso

9

«Un popolo che usa la stessa parola per dire “ieri” e “domani”, non si può dire che abbia un solido controllo sul tempo.»

SALMAN RUSHDIE, *I figli della mezzanotte*[1]

Sono le 8.50… o giù di lì. O almeno così dice il mio orologio da polso. Il fiacco sole di febbraio sta cercando di arrampicarsi sopra i tetti delle case di fronte. La radio è accesa, il caffè è pronto. È l’inizio di un’altra giornata, ma le note ritmate della *Cenerentola* di Prokof’ev che fanno vibrare gli altoparlanti della mia radio mi inquietano ricordandomi che il tempo incalza. I rintocchi della mezzanotte stanno dicendo a Cenerentola che il tempo concessole al ballo è terminato. E io sto perdendo tempo su Internet. Ho appena inserito la mia data di nascita in Wolfram Alpha e il computer mi dice che sono vivo da 18.075 giorni. Ma quando gli chiedo quanti me ne restano, mi risponde che non capisce la mia domanda. Forse va bene così. Non sono sicuro di voler sapere quante volte ancora le lancette del mio orologio completeranno i loro giri prima che le pulsazioni si interrompano.

Quand’ero più giovane pensavo che mi sarebbe stato possibile conoscere tutto. Avevo solo bisogno di tempo a sufficienza. Con gli anni che trascorrono inesorabilmente, comincio a rendermi conto che il tempo si sta esaurendo. Il senso di infinità tipico della gioventù si sta trasformando nella consapevolezza della finitudine tipica della mezza età. Forse non sarò in grado di conoscere tutto, ma è un mio limite personale, su cui tornerò nel prossimo Confine. Esiste la speranza che l’umanità nel suo complesso possa arrivare a conoscere tutto? Oppure il tempo è destinato a esaurirsi anche

collettivamente? Il tempo finirà punto e basta? Secondo me, tutti condividiamo la sensazione che probabilmente il tempo andrà avanti per sempre. Se continuo a cambiargli la batteria, il mio orologio non smetterà mai di ticchettare. Ma quando si passa al problema di che cosa accada all'estremità opposta, questa sicurezza viene meno: il tempo ha avuto un inizio o esiste da sempre?

Può ben darsi che io non sia in grado di guardare nel futuro e di fare predizioni, ma il passato è già accaduto. Non posso dunque guardare all'indietro per vedere se il tempo si prolunga all'infinito nel passato o se ha avuto un inizio? Il nostro attuale modello di universo richiede l'esistenza di un inizio. Percorrere a ritroso l'espansione dell'universo ci ha condotto a un momento che chiamiamo Big Bang, quando lo spazio aveva una densità infinita; una singolarità che si è verificata 13,8 miliardi di anni fa. Ma che cosa possiamo dire riguardo a ciò che precedette il Big Bang? Si tratta di un'area interdetta all'indagine scientifica tout court? Oppure ci sono segni rivelatori nello stato attuale dell'universo che potrebbero mostrarmi che cosa succedeva prima che tutto avesse inizio?

La natura del tempo angustia filosofi e scienziati da generazioni, dato che legato al tentativo di comprendere lo sfuggente concetto del tempo è il problema di comprendere la ragione per cui esiste qualcosa e non invece nulla. Parlare di un momento di creazione significa riferirsi a un momento nel tempo.

Sicuramente il Big Bang è considerato l'inizio dalla maggior parte delle persone. Anche chi ha tendenze religiose è incline ad ammettere che il Big Bang sia il momento della creazione dell'universo. In ogni caso, siamo indotti a chiederci che cosa successe prima.

Devo ammettere che non mi dispiaceva affatto la risposta standard che avevo raccolto nel corso degli anni discutendo con amici cosmologi di formazione matematica. Parlare di un «prima» presuppone l'esistenza del concetto di tempo prima del Big Bang. Le rivelazioni della teoria della relatività di Einstein, ovvero che tempo e spazio sono inseparabilmente legati, ci dicono che forse il tempo esiste solo una volta che è

stato creato lo spazio, ma se sia il tempo sia lo spazio sono nati solo in corrispondenza del Big Bang, allora il concetto di tempo «prima» del Big Bang non ha alcun significato.

Eppure si sentono mugugni d'insoddisfazione nei corridoi della cosmologia. Forse il tempo non può essere confezionato matematicamente in maniera tanto semplice. Forse la domanda su che cosa sia accaduto prima del Big Bang non può essere accantonata tanto facilmente. Ma provare a chiarire che cosa sia il tempo significa tuffarsi in alcune idee decisamente complicate.

Mentre fisso il mio orologio da polso non riesco a vedere le lancette muoversi, ma se distolgo lo sguardo e poi lo osservo di nuovo dopo un po', noto che le lancette si sono mosse. Adesso mi dicono che sono le 9.15… o giù di lì. All'interno dell'orologio ci sono alcuni minuscoli ingranaggi azionati da un minuscolo motore elettrico azionato a sua volta dalle oscillazioni di un minuscolo cristallo di quarzo. La pila nell'orologio instaura nel cristallo un potenziale elettrico che lo fa vibrare come una campana con una frequenza di 32.768 oscillazioni al secondo. La scelta di questo numero è dovuta alle sue proprietà matematiche. Corrisponde infatti a 2 elevato alla quindicesima potenza. Alla tecnologia digitale piacciono le potenze di 2 perché i circuiti possono convertirle velocemente in un impulso meccanico capace di azionare gli ingranaggi ogni secondo. Un aspetto importante è che questa frequenza non subisce in misura significativa gli effetti della temperatura, della pressione dell'aria e dell'altitudine (fattori che influiscono invece sulle oscillazioni di un pendolo, per esempio). Ed è questa vibrazione, questa ripetizione ciclica di un movimento, a costituire la chiave per segnare il passaggio del tempo. Però ci chiediamo: è sufficiente questo a descrivere il concetto di tempo? Con il mio orologio da polso che ticchetta senza sosta, non ci sono più scuse per indugiare oltre. Perciò…

Che cos'è il tempo?

Quasi tutti i tentativi di definire il tempo finiscono presto per portare a difficoltà dal carattere decisamente circolare. È una cosa di cui il mio orologio tiene traccia… È ciò che impedisce che tutto accada contemporaneamente… Sant'Agostino, teologo del IV secolo. riassunse le difficoltà della definizione nelle *Confessioni*: «Che cos'è dunque il tempo? Quando nessuno me lo chiede, lo so; ma se qualcuno me lo chiede e voglio spiegarglielo, non lo so».

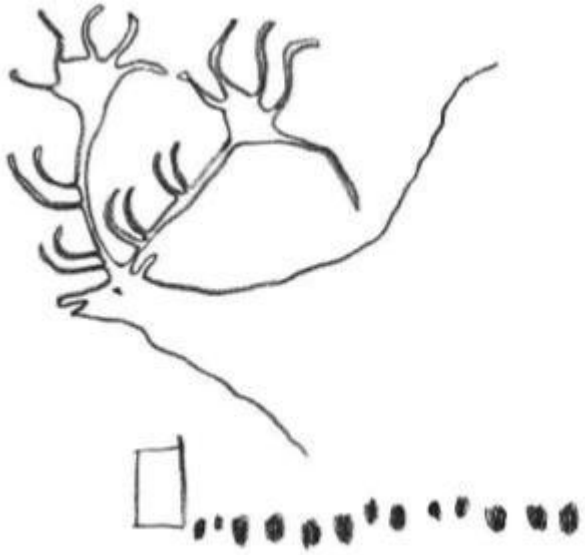
La misura del tempo è, nel profondo, un processo matematico, che dipende dall'individuazione di eventi che si ripetono ciclicamente, caratterizzati da un andamento regolare, come il moto dei pianeti o il succedersi delle stagioni o le oscillazioni di un pendolo o le vibrazioni di un atomo. Per citare le parole del fisico austriaco Ernst Mach, «il tempo è un'astrazione a cui arriviamo tramite il cambiamento delle cose».

Si ritiene che nelle grotte di Lascaux, in Francia, ci siano le prove di uno dei primi tentativi di tener traccia del tempo da parte dell'uomo. Le grotte furono scoperte nel 1940 da quattro ragazzi quando il loro cane, Robot, trovò un pertugio che conduceva all'interno. Sono famose per le straordinarie pitture rupestri d'epoca paleolitica che preservano: bisonti, cavalli, cervi e uri che corrono sulle pareti delle caverne.

Ho avuto l'opportunità di visitare Lascaux, ma a causa della delicatezza delle pitture rupestri di 15.000 anni fa, ho potuto solo vedere una loro replica nelle grotte ricostruite lì accanto. L'atmosfera ricreata dalle copie è comunque impressionante e quelle antiche rappresentazioni trasmettono un fortissimo senso d'energia. Ma l'artista non ha ritratto solo animali. Ci sono anche strane disposizioni di macchioline che punteggiano i dipinti. Secondo alcuni archeologi, questi punti sono la testimonianza di un tentativo di tener traccia del tempo.

Si ritiene che un gruppo di punti rappresenti le Pleiadi. Per molte culture antiche la ricomparsa di questa costellazione nel cielo notturno indicava l'inizio dell'anno. Mentre girellavo per la grotta mi imbattei in una sequenza di 13 punti in fila con un rettangolo disegnato a un'estremità. Sopra il rettangolo c'è l'immagine gigantesca di un maschio di cervo in calore. Più

avanti sulla stessa parete un'altra sequenza di 26 punti ha a un'estremità l'immagine, pure gigantesca, di una femmina di bisonte gravida.



Alcuni archeologi hanno interpretato questi punti come indicazioni di quarti del ciclo lunare, ovvero di ciò che in seguito sarebbero diventati i sette giorni della settimana. Queste fasi lunari erano facili da identificare nel cielo notturno. Perciò 13 quarti del ciclo della Luna rappresenterebbero un quarto di anno, cioè una stagione. Contare un quarto di anno dalla riapparizione delle Pleiadi in cielo porta alla stagione dei cervi in fregola, quando è più facile cacciarli. I 26 punti potrebbero essere interpretati come due insiemi di 13 punti, e dunque come rappresentazioni di due stagioni, ovvero di mezzo anno. Il che ci porta al momento in cui le femmine di bisonte sono gravide e, ancora una volta, più facili da cacciare.

Le pitture rupestri di Lascaux erano probabilmente una sorta di manuale d'addestramento per novelli cacciatori: un calendario che spiegava quali animali cacciare in quale periodo del ciclo annuale. Questo primo esempio di misurazione del tempo si basa sull'individuazione di schemi che si ripetono. E proprio questa sarebbe rimasta la chiave per comprendere la natura del tempo.

Il ciclo del Sole, della Luna e delle stelle avrebbero permeato il nostro modo di misurare il tempo fino al 1967. Non vi è nulla nel ciclo naturale che stabilisca come

dovremmo dividere il giorno. Furono invece le sensibilità matematiche dei babilonesi e degli egizi a darci un giorno diviso in 24 unità di tempo e, più tardi, un'ora suddivisa in 60 unità. La scelta di tali numeri si basava sulla loro elevata divisibilità. Napoleone tentò di rendere il tempo decimale introducendo un giorno di 10 ore, ma fu forse l'unico caso in cui egli non riuscì a imporre al mondo di contare qualcosa usando le dieci dita.

Fino al 1967 il secondo, l'unità di base per misurare il tempo, fu definito in vari modi sulla base del periodo che impiega la Terra a ruotare sul proprio asse oppure intorno al Sole, valori che non sono caratterizzati da una particolare costanza se li si confronta con il nostro moderno concetto di tempo. Per esempio, 600 milioni di anni fa la Terra completava una rotazione attorno al proprio asse in 22 ore e impiegava 400 giorni a orbitare attorno al Sole. Ma le maree degli oceani hanno lo strano effetto di trasferire energia dalla rotazione della Terra ai moti della Luna, il che dà come risultato un rallentamento della rotazione del nostro pianeta e un graduale allontanamento del suo satellite. Effetti simili producono l'allontanamento della Terra dal Sole, modificando il periodo temporale che il nostro pianeta impiega per completare un'orbita.

Visti i capricci dei moti planetari, invece di misurare il passaggio del tempo osservando l'universo, a partire dal 1967 i metrologi si affidarono all'atomo per quantificare la durata del minuto secondo, che oggi è definito come segue:

> la durata di 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondenti alla transizione di due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133 a riposo alla temperatura di 0 gradi Kelvin.

Non proprio una definizione semplice. E dovreste vedere l'apparecchio che lo misura. Sono andato a visitare il National Physical Laboratory, nei quartieri sudoccidentali di Londra, per dare un'occhiata all'orologio atomico che dice al Big Ben e ai segnali orari radiofonici quando annunciare lo scoccare dell'ora. Sicuramente non è un oggetto che possiate mettervi al polso: è enorme. Comprende sei laser che intrappolano gli atomi di cesio prima di proiettarli verso l'alto in una camera a microonde. Mentre ricadono sotto l'effetto della gravità in

quella che prende il nome di cascata di cesio, gli atomi vengono investiti dalle microonde, che li inducono a emettere radiazioni le cui frequenze sono usate per definire il minuto secondo.

Gli orologi atomici ospitati nei laboratori nazionali di tutto il mondo sono tra gli strumenti di misura più straordinari mai creati dall'uomo. La regolarità e l'universalità dell'atomo fanno sì che due orologi atomici posti uno accanto all'altro differirebbero al più per un secondo dopo 138 milioni di anni. Questi strumenti producono alcune delle misurazioni più precise che abbiamo mai ottenuto. Perciò potremmo forse dire di sapere che cos'è il tempo. Il problema è che il tempo non è costante come avevamo sperato. Se due orologi atomici si muovono l'uno rispetto all'altro, allora, come svelò Einstein all'inizio del Novecento, ben presto cominceranno a raccontare due storie molto diverse del tempo.

Torce elettriche su treni

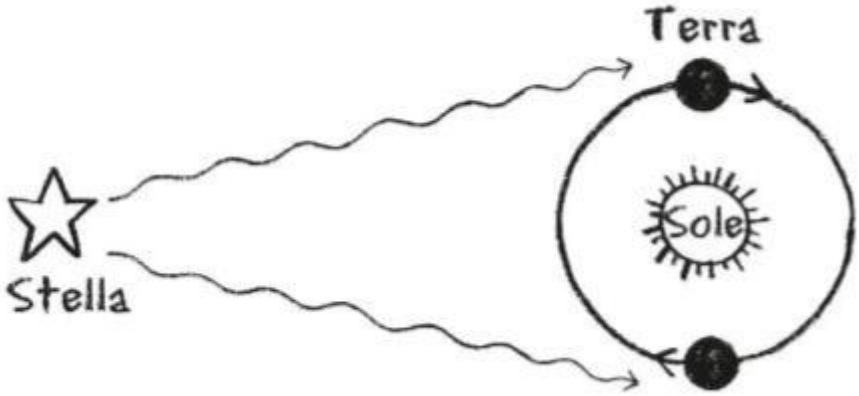
Newton pensava che il tempo e lo spazio fossero entità assolute contro cui era possibile misurare i nostri moti. Espose questa sua convinzione nei *Principia*: «Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente».

Per Newton, spazio e tempo erano come fondali su cui la natura metteva in scena la propria storia. Lo spazio era il palcoscenico su cui si rappresentava la vicenda dell'universo, mentre il tempo ne scandiva il decorso. Newton pensava che se si fossero posizionati degli orologi in ogni angolo dell'universo, una volta che fossero stati tutti sincronizzati avrebbero continuato a indicare la stessa ora ovunque. Altri non ne erano così convinti. Il suo acerrimo rivale Gottfried Leibniz pensava che il tempo esistesse solo come concetto relativo.

Alla fine, una scoperta di Albert Michelson e Edward Morley fece prevalere la visione di Leibniz su quella di Newton. I due scienziati statunitensi scoprirono infatti che se

misuriamo la velocità della luce nel vuoto, indipendentemente dal fatto che ci stiamo avvicinando alla fonte emittente o ce ne stiamo allontanando, il valore misurato non cambia. Quella rivelazione fu il seme che avrebbe condotto Einstein a scoprire che il tempo non era affatto assoluto come immaginato da Newton.

A prima vista il fatto che la velocità della luce sia la stessa comunque io mi muova rispetto alla fonte che la emette sembra controintuitivo. Considerate la Terra in orbita intorno al Sole. Se io misuro la velocità della luce proveniente da una stella lontana, mi aspetterei che essa sia più veloce quando mi dirigo verso la stella rispetto a quando me ne allontano.



Secondo la fisica newtoniana, se io sto correndo a 10 chilometri all'ora all'interno di un treno che si muove a 90 chilometri all'ora, significa che rispetto a una persona ferma sulla banchina sto viaggiando a una velocità combinata di 100 chilometri all'ora. Perché lo stesso non dovrebbe essere vero per la luce proiettata da una torcia elettrica sul treno? Perché la velocità della luce non è di 90 chilometri all'ora più elevata per la persona che la misura dalla banchina? Il fatto è che Newton si sbagliava sia riguardo alla velocità della luce sia a quella del tizio che corre sul treno rispetto alla persona ferma sulla banchina. Non ci si può limitare a sommare le loro velocità a quella del treno. I calcoli si rivelano ben più sofisticati.

Fu proprio cercando di comprendere perché la velocità della luce è invariante che Einstein, nel 1905, compì la svolta che ha cambiato la nostra prospettiva sull'universo, scoprendo che tempo e spazio non sono assoluti bensì variano in base al moto

relativo dell'osservatore. È noto che all'epoca Einstein era un dipendente dell'ufficio brevetti svizzero, dove aveva l'incarico di valutare le domande relative a un'ampia gamma di nuove invenzioni, dagli impianti di frantumazione alle macchine per scrivere elettriche. Tra l'altro, Einstein doveva prendere in esame i tentativi di creare strumenti per sincronizzare il tempo utilizzando l'elettricità, un compito importante in un mondo che stava diventando sempre più interconnesso. Fu proprio questo incarico apparentemente ordinario a ispirare a Einstein gli esperimenti concettuali che lo condussero a formulare la teoria della relatività speciale.

▶ *Formula relativistica per combinare velocità*

Per calcolare la velocità apparente *s* di un passeggero che corre a *u* chilometri all'ora lungo un treno che viaggia a *v* chilometri all'ora, Einstein scoprì che è necessario usare l'equazione seguente:

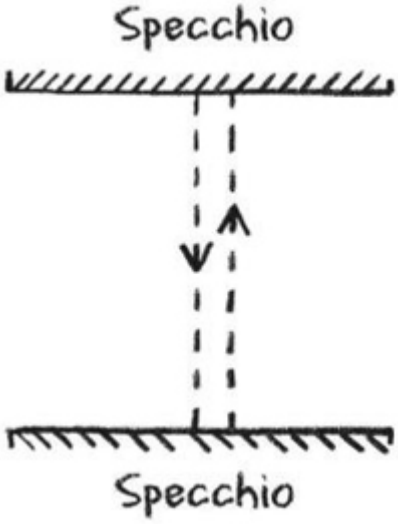
$$s = \frac{u + v}{1 + (uvlc^2)}$$

dove *c* è la velocità della luce. Quando le velocità *u* e *v* sono piccole rispetto a *c*, il termine uv/c^2 risulta estremamente piccolo. Ciò significa che il valore della velocità *s* può essere approssimato al valore della somma $u + v$. Ma quando le velocità *u* e *v* si avvicinano alla velocità della luce, l'approssimazione non vale più e la formula dà una risposta diversa. La formula è tale per cui non può produrre mai un valore della velocità combinata maggiore di quello della velocità della luce. ◀

Rallentare il tempo

Per spiegarvi le nuove idee di Einstein sul tempo, ho bisogno di un orologio. Un orologio richiede qualcosa che si ripeta a intervalli regolari. Potrei usare uno degli orologi atomici del National Physical Laboratory oppure il mio orologio da polso, ma in realtà la luce è il miglior orologio che si possa utilizzare per rivelare lo strano effetto del moto relativo sul tempo. Sfrutterò la scoperta fatta da Michelson e Morley, ovvero il fatto che la velocità della luce sembra non dipendere dal modo in cui ci si muove quando la si misura.

Perciò permettetemi di misurare il tempo grazie a uno strumento in cui ogni ticchettio corrisponde a un rimbalzo della luce tra due specchi.



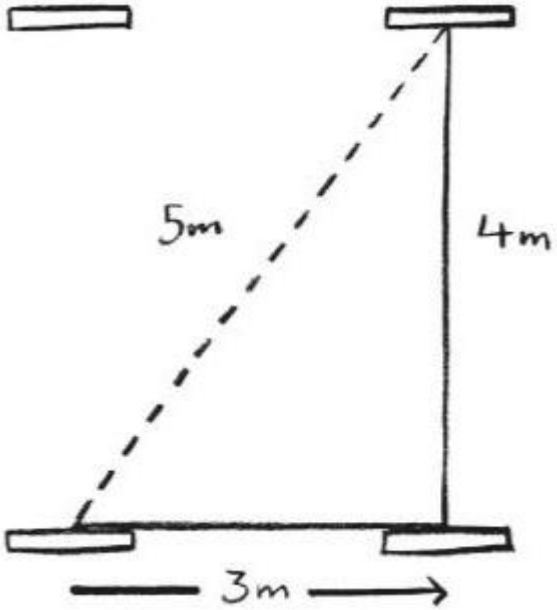
Porterò con me uno di questi orologi su una navicella spaziale e lascerò l'altro a voi qui sulla superficie terrestre. Dato che, come scopriremo, la distanza nello spazio si contrarrà nella direzione del movimento, devo sistemare il mio orologio in modo tale per cui la luce si muova perpendicolarmente rispetto alla direzione della navicella. Ciò serve a garantire che la distanza tra gli specchi resti invariata in entrambe le ubicazioni. Per mostrare che – dalla vostra prospettiva terrestre – il mio orologio ticchetta a un ritmo più lento rispetto a quello posto a Terra, non mi serve nulla di più sofisticato del teorema di Pitagora.

La rivelazione di Einstein dipende dal fatto che la persona sulla Terra deve registrare un identico valore della velocità della luce tanto sulla navicella quanto a Terra. È questa l'importante scoperta compiuta da Michelson e Morley: la velocità della luce è la stessa ovunque. Non ha importanza se la navicella si sta muovendo, perché quel movimento non può aumentare la velocità della luce. Per registrare la velocità, dobbiamo misurare la distanza percorsa e dividerla per il tempo impiegato a percorrerla (rispetto agli strumenti di misura posti sul suolo terrestre). Vediamo dunque quanto spazio percorre la luce quando è emessa da uno specchio e colpisce lo specchio opposto nel mio orologio situato all'interno della navicella spaziale.

Supponiamo che la distanza tra i due specchi sia di 4 metri. Ipotizziamo anche che nel tempo che impiega la luce per andare da uno specchio all'altro sulla navicella, questa abbia

percorso 3 metri secondo quanto avete misurato dalla Terra. Il teorema di Pitagora ci dice che in realtà la luce ha percorso l'ipotenusa del triangolo i cui cateti hanno lunghezza 4 e 3, e perciò ha coperto una distanza di 5 metri. Questa è tutta la matematica che vi serve per comprendere la teoria della relatività speciale di Einstein.

Da qui possiamo calcolare che la navicella sta viaggiando a 3/5 della velocità della luce rispetto alla Terra: la navicella spaziale percorre 3 metri nel tempo che la luce impiega per percorrerne 5.

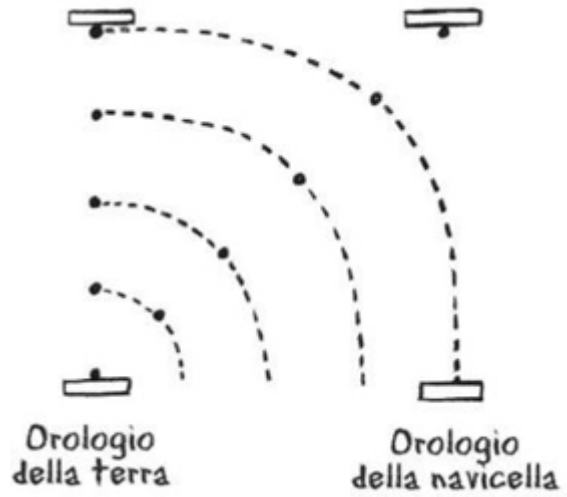


L'orologio della navicella spaziale si sposta di 3 metri nel tempo che impiega la luce a percorrere lo spazio che separa gli specchi posti a 4 metri di distanza. Per il teorema di Pitagora ciò significa che in realtà la luce ha percorso 5 metri.

Il punto chiave è che nel frattempo, sulla Terra, la luce avrà percorso la stessa distanza, dato che la sua velocità deve essere identica ovunque. Il vostro orologio al suolo ha le stesse dimensioni di quello sulla navicella, perciò la luce avrà coperto la medesima distanza, ovvero 5 metri. Ma gli specchi sono separati da 4 metri. Ciò significa che la luce ha già colpito lo specchio superiore e sta tornando verso quello inferiore, e che si trova a un quarto della distanza che lo separa dal tic successivo. Perciò, dal punto di vista della persona che si trova sulla Terra, il tempo corre più veloce, dato che un tic dell'orologio posto sulla navicella copre lo stesso tempo di 1 tic e 1/4 dell'orologio terrestre. Dal vostro punto di vista,

insomma, il mio orologio nello spazio va più lento del vostro in una proporzione di 4 a 5!

Per farci un'idea della ragione per cui ciò si verifica, diamo un'occhiata al fascio di luce mentre viaggia sulla navicella spaziale e sulla Terra. Il fascio procede alla stessa velocità nei due orologi. I fermo immagine riportati qui di seguito mostrano dove si trova la luce in vari istanti nel tempo. Siccome la luce sulla navicella deve viaggiare nello spazio nella direzione in cui si sta muovendo la navicella, non può percorrere la stessa distanza nella direzione dello specchio opposto dell'orologio. Perciò, dalla vostra prospettiva terrestre, la luce raggiunge lo specchio nel vostro orologio prima di quanto non faccia la luce nel mio orologio sulla navicella. Ciò significa che il vostro orologio terrestre «ticchetta» più rapidamente.



Le linee tratteggiate rappresentano i punti raggiunti da ciascun fascio di luce in corrispondenza di ogni fermo immagine preso dalla Terra.

Per certi versi, parrebbe sensato… eppure quando confronto i due orologi dalla mia prospettiva sulla navicella spaziale le cose assumono un aspetto difficile da conciliare con il nostro intuito. Per comprendere la ragione di questa stranezza dobbiamo applicare il cosiddetto «principio di relatività». Esso afferma che, se ci si muove di moto rettilineo uniforme (cioè senza cambiare velocità né direzione), allora è impossibile stabilire se ci si sta muovendo oppure si è fermi. L'enunciazione del principio di relatività non va attribuito a Einstein: lo si trova già nei *Principia* di Newton, anche se è a Galileo che andrebbe assegnato il merito di averlo compreso

per primo. Il principio descrive la strana esperienza che probabilmente avete vissuto trovandovi in stazione a bordo di un treno fermo accanto a un altro. In questa situazione, quando il nostro treno si mette in movimento, ci è impossibile stabilire se siamo noi a muoverci oppure il treno accanto finché non vediamo la banchina (perché l'effetto funzioni, l'accelerazione deve essere così graduale che non riusciamo a percepirla).

Quando lo si applica ai due orologi posti sulla navicella e sulla superficie terrestre, il principio produce un risultato decisamente strano. Dal mio punto di vista di passeggero della navicella, infatti, è la Terra che si allontana da me a 3/4 della velocità della luce. Se faccio un'analisi identica a quella precedente, ne dedurrò che è il vostro orologio terrestre a essere più lento, non il mio. A quanto pare il tempo è un concetto molto meno ovvio di quello che sperimentiamo nella vita quotidiana.

L'intera faccenda sembra così stramba da risultare inverosimile. Com'è possibile che l'orologio sulla navicella sia più lento dell'orologio sulla Terra e contemporaneamente l'orologio sulla Terra più lento di quello sulla navicella? Eppure, appena dispongo dell'osservazione incontrovertibile del fatto che la velocità della luce è costante indipendentemente da come io la misuri, la matematica mi porta a questa conclusione. È uno dei motivi per i quali amo la matematica. È come una tana di coniglio logica che vi fa precipitare in impensabili paesi delle meraviglie.

Non è solo l'orologio posto sulla navicella spaziale che appare ticchettare più lentamente dalla prospettiva terrestre. Anche ogni altra cosa che, sulla navicella, tiene traccia del trascorrere del tempo deve rallentare. Se me ne sto seduto nella mia navicella, non posso rendermi conto del fatto che il mio orologio si sta comportando in maniera inusuale. Cioè qualsiasi cosa misuri il tempo subirà gli stessi effetti: il cristallo di quarzo che vibra nel mio orologio da polso, il brano di Prokof'ev diffuso dalla radio di bordo, l'invecchiamento del mio organismo, l'attività neurale del mio cervello. Sulla navicella non mi renderò conto di nulla di strano perché tutto ciò che si trova nel veicolo ticchetterà allo stesso ritmo.

Ma dalla vostra prospettiva terrestre l'impressione è che il mio orologio da polso rimanga indietro, che il brano di Prokof'ev abbia un tono più profondo e lamentoso, che io invecchi più lentamente e che i miei neuroni non si attivino con l'usuale velocità. Il tempo e la percezione del suo trascorrere sono relativi. Dipendono da un raffronto tra cose. Se tutto rallenta o accelera alla stessa velocità, io non sono in grado di rendermene conto. Tutto mi appare normale a bordo della navicella spaziale. La cosa curiosa è che quando volgo lo sguardo verso la Terra, verso di voi, vedo tutto ciò che vi circonda rallentare a un passo di lumaca.

Accelera e vivrai più a lungo

Un esempio assai notevole di questa differenza relativa nel passare del tempo è lo strano caso del decadimento del muone in cui ci siamo imbattuti nel Secondo Confine. Quando i raggi cosmici investono l'alta atmosfera, le collisioni creano uno sciame di particelle fondamentali, tra cui il muone, una versione pesante dell'elettrone. I muoni non sono stabili e decadono molto rapidamente in forme di materia più stabili.

Gli scienziati parlano di emivita o tempo di dimezzamento. Il termine sta a indicare la quantità di tempo necessario perché una popolazione di particelle si riduca della metà a causa del decadimento. (Capire quando avverrà il decadimento per una specifica particella risulta ancora misterioso e, come ho visto nel Terzo Confine, l'unico metodo di cui dispongo per esercitare un potere predittivo su un tale evento è il lancio del mio dado da gioco.) Nel caso dei muoni, metà della loro popolazione avrà subito un decadimento in media dopo 2,2 microsecondi.

La velocità a cui i muoni decadono dovrebbe avere come conseguenza che, considerata la distanza da coprire per raggiungere la superficie terrestre, non molti sopravvivranno al viaggio. Tuttavia, gli scienziati rilevavano molti più muoni di quanti prevedessero. La ragione è che l'orologio a bordo del muone rallenta, dato che la particella sta viaggiando a una

velocità prossima a quella della luce. Perciò l'emivita del muone, quando la si misura con un orologio posto sulla Terra, risulta più lunga di quanto ci aspetteremmo. L'orologio interno del muone va più lento di quello terrestre e di conseguenza, dato che nel sistema di riferimento del muone non è passato molto tempo, i 2,2 microsecondi che ci vogliono perché metà dei muoni decadano risultano in realtà molto più lunghi dei 2,2 microsecondi misurati da un orologio sulla superficie terrestre.

Ma come si svolgono i fatti dalla prospettiva del muone? L'orologio che si trova nel muone procede in modo normale, mentre è l'orologio terrestre a rallentare. Perciò, da questa prospettiva, che cosa fa sì che i muoni che raggiungono la superficie della Terra siano più numerosi del previsto? Il punto è che gli oggetti in moto reciproco influenzano non soltanto il tempo ma anche lo spazio. Perciò a subirne gli effetti è anche lo spazio che si interpone tra la superficie del pianeta e il muone. Le distanze si contraggono quando i due oggetti si muovono e dunque, dalla prospettiva del muone, la distanza tra l'alta atmosfera e la superficie terrestre è molto più breve che dalla nostra prospettiva. Perciò i muoni non pensano di dover fare tanta strada, e raggiungono la loro destinazione in gran numero.

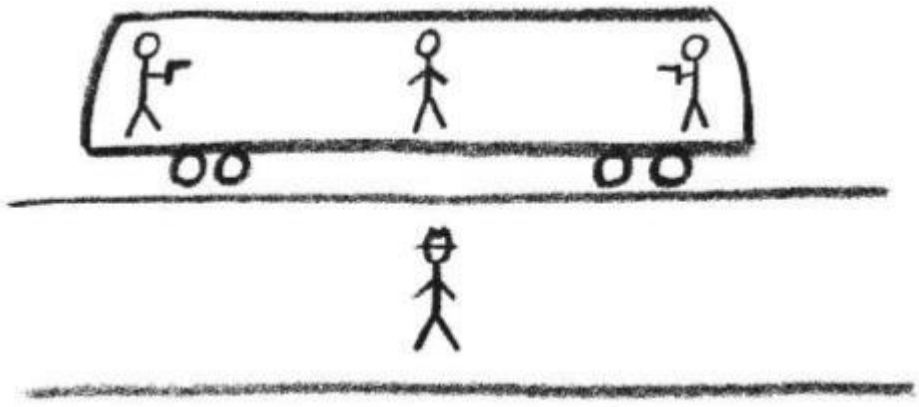
È una strategia che potrei sfruttare per rubare qualche giorno in più alla mia vita limitata? Posso ingannare la mia emivita? Il problema è che, come ho spiegato, tutto rallenta sulla mia navicella spaziale. Non spremerò un po' di tempo in più dall'universo per risolvere i problemi matematici a cui sto lavorando, perché se è possibile che il mio corpo invecchi più lentamente, anche i miei neuroni si attiveranno più lentamente. Il principio di relatività sta a significare che, per quanto mi riguarda, io ho la sensazione di stare fermo ed è tutto il resto a sfrecciarmi accanto.

Relativity dogs

Le idee concepite da Einstein nel 1905 mi rivelano che il tempo che leggo sul mio orologio è molto più fluido di quanto

pensassi. La natura assoluta del tempo nell'universo viene messa ulteriormente in discussione quando proviamo a capire che cosa significhi il fatto che due eventi si verifichino simultaneamente. Era proprio questo il problema con cui si era confrontato Einstein lavorando a brevetti relativi alla sincronizzazione dell'ora. Ciò che si scopre è che la domanda è priva di senso. O almeno che la risposta dipende dal nostro sistema di riferimento.

Partiamo da una scena di un film fittizio che intitolerò *Relativity Dogs* in onore di Tarantino e del suo *Reservoir Dogs* (in italiano, *Le iene*). La scena si svolge su un treno (come succede spesso con la relatività). Due persone armate di pistole identiche si trovano alle due estremità di un vagone. Esattamente a metà strada tra i due c'è un terzo uomo. Il treno sta transitando per una stazione a gran velocità. Dalla banchina, un poliziotto osserva la scena. Consideriamo prima la situazione dalla prospettiva del treno. In riferimento ai membri della banda, il treno può essere considerato fermo. Le due pistole sparano insieme. Le pallottole colpiscono l'uomo che sta al centro del vagone simultaneamente. La velocità dei proiettili e la distanza che devono coprire sono le stesse e, dalla prospettiva di chiunque si trovi sul treno, i due uomini armati hanno premuto il grilletto nello stesso istante. In effetti, la vittima ha visto le due pistole emettere un lampo di luce contemporaneamente un attimo prima di essere colpito dai proiettili.



Ma che succede dalla prospettiva del poliziotto? Supponiamo che la vittima lo oltrepassi esattamente nel momento in cui i due lampi di luce la raggiungono, cosicché anche il poliziotto vede i lampi nello stesso istante. A quel punto comincerà a

chiedersi: quanta strada ha percorso la luce? Sebbene in quest'istante si trovino alla stessa distanza da lui, nel momento in cui entrambe le pistole hanno sparato quella che si trova nella parte anteriore del vagone era in realtà più vicina. Perciò la luce emessa da questa pistola aveva meno strada da percorrere rispetto alla luce proveniente dal lato opposto del vagone. In tal caso, essendo la velocità della luce costante, se i due lampi sono arrivati contemporaneamente significa che la luce deve essere partita dalla pistola situata in fondo al vagone prima di quella emessa dalla pistola situata all'estremità anteriore. Perciò al poliziotto sembrerà che l'uomo in fondo al vagone abbia sparato per primo. Collocando un altro poliziotto su un treno che viaggia nella direzione opposta, tutto si inverte e il secondo agente giungerà alla conclusione che sia stata la pistola all'estremità anteriore del vagone a sparare per prima.

Chi ha sparato per primo, dunque? Dalla prospettiva del poliziotto sulla banchina, è stato l'uomo situato in fondo al vagone, ma dalla prospettiva del poliziotto a bordo del treno che corre nella direzione opposta è stato l'uomo situato nella parte anteriore del vagone ad aver sparato per primo. Perciò, in assoluto, chiedersi quale sia stata la pistola a esplodere per prima il colpo non ha senso. Il tempo assume significati diversi per diversi sistemi di riferimento. In realtà esiste qualcosa di assoluto per tutti gli osservatori, ma richiede l'unione di spazio e tempo.

Il problema è che sto cercando di misurare la distanza tra due oggetti, la quale cambia a seconda di come io mi muovo rispetto ai due punti. In modo analogo, cambia anche il tempo che separa due eventi. Ma se ora definisco una nuova unità che misuri la distanza temporale e spaziale insieme, posso ottenere qualcosa di invariante, ovvero indipendente da chi sta compiendo la misurazione. Fu questa l'idea geniale del matematico Hermann Minkowski, ex insegnante di Einstein al Politecnico di Zurigo. Dopo essere venuto a conoscenza delle idee di Einstein, Minkowski realizzò immediatamente che le geometrie multidimensionali scoperte cinquant'anni prima dal matematico tedesco Bernhard Riemann costituivano il fondale perfetto per la teoria di Einstein.

Per coloro che sono felici di poter ammirare una formula, la distanza tra un evento che ha luogo nel punto (x_1, y_1, z_1) all'istante t_1 e un evento che ha luogo nel punto (x_2, y_2, z_2) all'istante t_2 è definita da

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - c^2(t_1 - t_2)^2}$$

I primi tre termini della formula

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$$

costituiscono l'usuale distanza misurata nello spazio (con l'utilizzo del teorema di Pitagora). L'ultimo termine è l'usuale misura di una differenza temporale. Probabilmente la vostra prima idea sarebbe quella di sommare queste due distanze. La cosa geniale che fece Minkowski fu di sottrarre la seconda dalla prima. Ciò crea una misura di tipo molto diverso e porta a una geometria che non obbedisce alle normali leggi della geometria sviluppata dai greci. Nella geometria minkowskiana l'universo non è uno spazio tridimensionale animato nel tempo, ma un unicum quadridimensionale che prende il nome di spaziotempo e i cui punti sono individuati da quattro coordinate (x, y, z, t), tre per lo spazio e una per il tempo. Minkowski presentò questo nuovo modo geometrico di guardare all'universo due anni dopo che Einstein aveva annunciato la teoria della relatività speciale nel 1905.

Se la formula vi dà la sensazione di saperne quanto prima, non deprimetevi. Anche Einstein era piuttosto diffidente di fronte a ciò che considerava una sorta di trucco matematico. Ma la geometria quadridimensionale di Minkowski avrebbe prodotto una nuova mappa dell'universo. Come dichiarò lui stesso, «d'ora in avanti lo spazio a sé stante e il tempo a sé stante sono destinati a dissolversi, riducendosi a pure ombre, e solo un genere d'unione dei due conserverà una realtà indipendente».

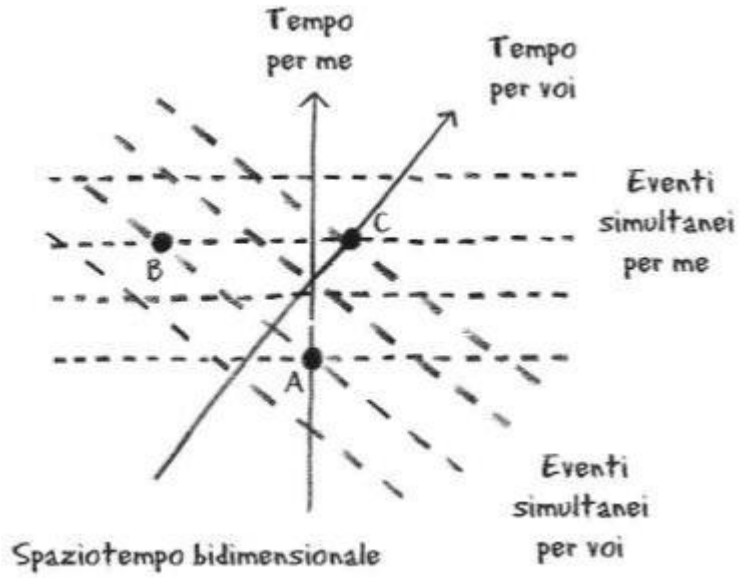
Questa fu invece la reazione di Einstein alla matematizzazione delle sue idee: «Da quando i matematici si sono gettati sulla relatività, io stesso non la capisco più». Tuttavia, si rese conto molto presto che la matematica costituiva il linguaggio migliore per orientarsi in quel nuovo e strano universo chiamato spaziotempo.

L’efficacia di misurare la distanza nello spaziotempo consiste nel fatto che, quando considero un osservatore diverso che si muove rispetto agli eventi, anche se gli intervalli temporali e le distanze spaziali assumeranno valori diversi, questa nuova distanza relativa a eventi nello spaziotempo risulterà la stessa. Insomma, Newton aveva ragione quando affermava che avrebbe dovuto esistere uno sfondo assoluto. Il suo errore fu considerare tempo e spazio separatamente. Dopo Einstein, dobbiamo considerarli insieme. Ed è questo aspetto ibrido della natura di tempo e spazio che rende il problema di che cosa sia accaduto prima del Big Bang davvero interessante.

Tanto per cominciare, ci costringe a considerare il tempo sotto una luce molto diversa. Dovremmo pensare all’universo come a un unicum di spazio e tempo in cui i concetti di «prima» e «dopo» diventano opinabili quanto l’affermare che un punto dello spazio si trova di fronte a un altro: dipende dalla prospettiva. Il che è decisamente sconcertante. Per entrambi i poliziotti della mia scena cinematografica fittizia, c’è un momento in cui uno dei due uomini armati non ha ancora premuto il grilletto. Forse i due uomini hanno il tempo di fermarsi e riconsiderare le loro azioni, di decidere di non sparare e lasciare che sia l’altro il responsabile dell’azione. Eppure qualcosa non quadra. Per il poliziotto sulla banchina la decisione è nelle mani dell’uomo all’estremità anteriore del vagone, invece per il poliziotto sul treno che viaggia nella direzione opposta è l’uomo in fondo al vagone ad avere quest’opportunità. Ciò significa che il futuro non è affatto nelle nostre mani?

In genere, quando disegno un grafico della distanza rispetto al tempo, l’asse del tempo corre in orizzontale, mentre la distanza (percorsa da un pallone, per fare un esempio) è rappresentata sull’asse verticale. Ma lo spaziotempo non mi permette di dividere spazio e tempo in modo altrettanto netto. Quando pensiamo allo spazio e al tempo come a un unicum, dobbiamo fare attenzione a non pensare a una direzione privilegiata di questo unicum che rappresenta il tempo e ad altre tre direzioni indipendenti che tracciano lo spazio. In questo spaziotempo due direzioni distinte possono

rappresentare la dimensione temporale. Dipende da come ci stiamo muovendo nello spazio. In questa nuova visione spazio e tempo sono mescolati.



Sulla vostra linea del tempo gli eventi A e B si verificano simultaneamente e C più tardi. Per me, tuttavia, B e C sono eventi simultanei, mentre A si è verificato in precedenza. Se tra A e C c'è un nesso di causalità, allora per le linee del tempo di tutti A si verificherà sempre prima di C. Ma B non ha nessi causali né con A né con C, perciò ci sono linee del tempo che pongono l'evento B prima di A, oppure dopo C.

Ciò costituisce un'autentica sfida per la mia idea intuitiva di universo. Supponete che io mi stia allontanando da voi a bordo di una navicella spaziale. Se traccio delle linee che collegano tutti gli eventi simultanei dalla mia prospettiva, in questa geometria dello spaziotempo le vostre linee corrispondenti formeranno un insieme totalmente diverso.

In hindi e in urdu la parola *kal* significa tanto ieri quanto oggi. Nel brano tratto da *I figli della mezzanotte* che cito all'inizio di questo capitolo, Salman Rushdie scherza sul fatto che un popolo che usa la stessa parola per indicare ieri e domani non può avere un saldo controllo del tempo. Ma forse quel popolo aveva intuito qualcosa. Il concetto di «prima» o quello di «dopo» non sono definiti con la chiarezza che alcune lingue suggeriscono.

Eppure, anche in presenza di questa unione di spazio e tempo, il tempo mantiene una qualità che lo distingue dallo spazio. L'informazione non può viaggiare più veloce della luce. La causalità sta a indicare che non possiamo posizionarci

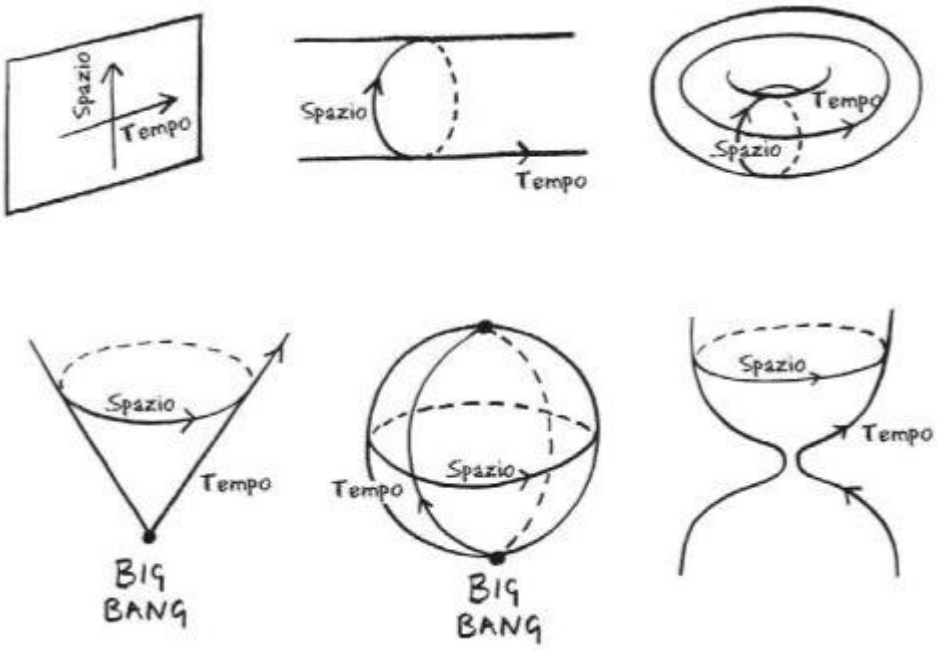
in un punto dello spaziotempo in cui il proiettile colpisce la vittima prima di essere esploso. Ci sono dei vincoli sul modo in cui si possono tracciare queste linee del tempo nello spaziotempo. Per raggiungere i limiti dell'universo e della conoscenza, la mia comprensione intuitiva dello spazio e del tempo non mi sarà d'aiuto. Dovrò invece, come Einstein dovette ammettere controvoglia, affidarmi alla matematica perché mi conduca fin là.

La forma del tempo

Proprio come posso parlare della forma dello spazio, posso anche parlare della forma dello spaziotempo. Il mio primo istinto è di immaginare che il tempo sia una linea retta, il che mi lascia ben poche scelte oltre a quella di pensare a una linea che è finita, e dunque ha un inizio, oppure a una linea che è infinita. Ma ci sono altre possibilità. Siccome tempo e spazio assommano a quattro dimensioni, dovrò considerare forme che non posso vedere e che la matematica mi descriverà. Tuttavia, posso visualizzare forme che rappresentino porzioni dello spaziotempo e che mi permettano di capire che cosa intendo quando mi chiedo cosa accadeva prima del Big Bang. Immaginate per esempio che ci sia solo una dimensione spaziale. In tal caso lo spaziotempo risulta bidimensionale. Ciò crea una superficie visualizzabile, un foglio di gomma con cui posso giocare deformandolo in modi interessanti.

Credo che il modello di spaziotempo bidimensionale immaginato dalla grande maggioranza delle persone sia un foglio piano illimitato, con il tempo che si estende all'infinito in avanti e all'indietro e lo spazio che è anch'esso unidimensionale e infinito. Ma come ho scoperto esplorando il Confine precedente, lo spazio potrebbe essere finito. Potrei avvolgerlo per creare un cerchio e allora il tempo lo estenderebbe all'infinito in maniera tale per cui lo spaziotempo assumerebbe l'aspetto di un cilindro. Ovviamente potrei congiungere questo cilindro in modo da creare uno spaziotempo a forma di ciambella o di toro. Questa soluzione renderebbe finito anche il tempo. In un siffatto modello di

spaziotempo potrei compiere una traiettoria ad anello e ritornare a un momento precedente della storia. Il logico Kurt Gödel propose soluzioni delle equazioni della relatività generale di Einstein che posseggono questa caratteristica. Gödel, come vi spiegherò nell'ultimo Confine, si divertiva a mettere in crisi le altrui aspettative logiche. Ma i suoi circoli spaziotemporali sono considerati in genere mere curiosità, dato che risalire indietro nel tempo causa troppi problemi in materia di causalità.



Possibili forme di uno spaziotempo bidimensionale.

Per ottenere un'immagine più realistica dello spaziotempo, ho bisogno di creare una geometria che tenga conto del nostro modello attuale della storia dell'universo, che prevede un inizio: il Big Bang. Per visualizzare questo concetto nel mio universo spaziotemporale a due dimensioni, potrei avvolgere la superficie affinché assuma l'aspetto di un cono. In questo caso le dimensioni dell'universo, che è un semplice cerchio, si restringono man mano che procedo indietro nel tempo finché non incontro il punto corrispondente al vertice del cono. È qui che il tempo inizia. Prima non c'è nulla. Né spazio né tempo. Solo un punto di densità infinita. Si tratta di un buon modello per qualcosa che assomiglia molto al Big Bang.

Oppure, invece di pensare allo spaziotempo schiacciato fino a ridursi a un punto, potremmo immaginarlo simile a una

sfera. Anche questa scelta influisce sulla risposta alla domanda relativa a ciò succedeva prima del Big Bang. Se, sulla Terra, mi dirigo a sud lungo una linea di longitudine, quando raggiungo il Polo Sud compio una capriola improvvisa e mi ritrovo su un'altra linea di longitudine sul lato opposto. Ma i valori di longitudine altro non sono che numeri da noi assegnati ai punti della superficie terrestre. Il passaggio per il Polo Sud non rappresenta un'inversione discontinua nella forma della superficie, ma solo un salto nel modo in cui la misuriamo.

Perciò, cambiando le coordinate, quello che appare come un punto di discontinuità può assumere un aspetto continuo, liscio come dicono i matematici. Questa è una delle idee formulate da Hawking riguardo al tempo. Forse dovrei provare a incorporare lo spaziotempo in una forma tale per cui quel punto che sembra indicare un'interruzione del tempo è in realtà soltanto il Polo Sud della forma dello spaziotempo. In fondo, come rispondereste alla domanda: che cosa c'è a sud del Polo Sud? È una domanda priva di senso.

Vale la pena di sottolineare che quando sorge un interrogativo a cui sembra impossibile rispondere, spesso siamo costretti a riconoscere che si tratta di un quesito mal posto. Il principio di indeterminazione di Heisenberg non è tanto un'espressione del fatto che non possiamo conoscere contemporaneamente la posizione e la quantità di moto di una particella quanto piuttosto del fatto che le due cose in realtà non esistono simultaneamente. In modo analogo, si è tentato di mostrare che la domanda: «Che cosa accadeva prima del Big Bang?» non è una di quelle domande di cui è impossibile conoscere la risposta. Si tratta piuttosto di una domanda priva di senso. Parlare di «prima» significa presupporre l'esistenza del tempo, ma se il tempo esistesse solo dopo il Big Bang?

Immaginandomi la forma dello spaziotempo comincio a rendermi conto della ragione per cui gli scienziati hanno rigettato la questione relativa alla comprensione del tempo prima del Big Bang, considerandola priva di senso. Esistono tuttavia altre forme dello spaziotempo che consentono al tempo di avere una storia precedente al Big Bang. Che succederebbe se il cono, invece di terminare in un punto,

nascesse rimbalzando da un universo in contrazione esistente prima del Big Bang? Per farmi davvero un'idea della storia del tempo mentre procedo a ritroso verso il Big Bang, ho bisogno di comprendere che cosa succede quando il tempo si avvicina a un punto in cui la gravità è maggiore. Fu questa la seconda grande scoperta di Einstein: anche la gravità influisce sul ticchettio dell'orologio del tempo.

Perché i grattacieli non vi si confanno

Il secondo attacco di Einstein alla natura del tempo si verificò quando aggiunse la gravità alla miscela. La sua teoria della relatività generale, elaborata tra il 1907 e il 1915, descrive la natura geometrica stessa della gravità. La gravità non è tanto una forza quanto piuttosto una proprietà del modo in cui questo foglio quadridimensionale dello spaziotempo si incurva. La Luna orbita attorno alla Terra perché la massa del nostro pianeta distorce la geometria dello spaziotempo in modo tale per cui la Luna ruota lungo la forma incurvata che lo spaziotempo assume in questa regione. La forza di gravità è un'illusione. Non esiste alcuna forza; sono invece gli oggetti a muoversi in caduta libera attraverso la geometria dello spaziotempo, e ciò che osserviamo è la curvatura di questo spazio. Ma se i corpi dotati di grande massa sono in grado di distorcere la forma dello spazio, possono anche avere effetti sul tempo.

Si tratta di un'altra delle grandi rivelazioni dovute a Einstein, si fonda ancora una volta su un principio di equivalenza. Le strane conseguenze della relatività speciale traggono origine dal principio di relatività, secondo cui è impossibile stabilire se sono io a muovermi o se invece è l'ambiente in cui sono immerso a muoversi rispetto a me. Einstein applicò un principio di equivalenza analogo alla gravità e all'accelerazione.

Se steste galleggiando all'interno di un'astronave e io piazzassi un grosso pianeta sotto la vostra navicella, verreste attratti verso il pavimento. Questa è la forza di gravità. Ma se

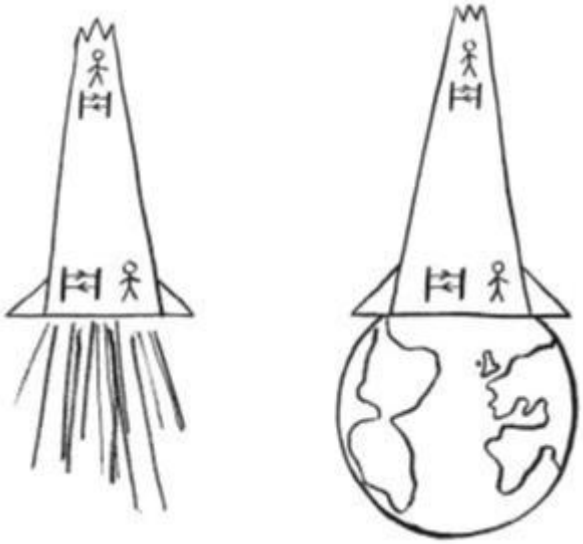
io imprimessi un'accelerazione verso l'alto all'astronave, voi sperimentereste esattamente lo stesso effetto: sareste attratti verso il pavimento. Einstein ipotizzò che non ci fosse alcun modo per distinguere gravità e accelerazione, dato che entrambe producono i medesimi effetti.

Ciò risulta particolarmente interessante se lo applico all'orologio a fotoni all'interno della nostra navicella spaziale. Supponiamo che la navicella sia alta quanto il grattacielo Shard di Londra. Sistemerò un orologio a fotoni alla base della navicella e un altro sulla sua cima. Accanto a ciascun orologio dislocherò un astronauta che mi aiuterà a confrontarne il funzionamento.

L'astronauta che si trova sul fondo della navicella invierà un impulso di luce verso l'astronauta che si trova sulla cima ogni volta che il suo orologio emetterà un singolo ticchettio. A questo punto l'astronauta posizionato in cima alla navicella potrà confrontare l'arrivo di questi impulsi di luce con il ticchettio del suo orologio. In assenza di accelerazione o di gravità, l'arrivo degli impulsi e il ticchettio degli orologi saranno sincronizzati. Adesso permettetemi di imprimere un'accelerazione all'astronave nella direzione della sua sommità. In questa situazione, quando viene emesso un impulso dal fondo della navicella, poiché l'astronave sta accelerando, la luce dovrà percorrere una distanza maggiore ogni volta, così che ci vorrà sempre più tempo perché ciascuno degli impulsi raggiunga la cima della navicella, e l'astronauta posizionato in quel punto li riceverà a un ritmo più lento. La situazione ha qualche similitudine con quella dell'effetto Doppler che sperimentiamo con i suoni quando un allontanamento dalla sorgente produce un calo della frequenza e di conseguenza la percezione di un tono più grave. In questo caso, tuttavia, è importante notare che la navicella non sta semplicemente muovendosi a velocità costante, ma sta accelerando.

D'altra parte l'astronauta che riceve i segnali luminosi interpreterà la riduzione della frequenza degli impulsi affermando che l'orologio posto sul fondo dell'astronave va più lento rispetto a quello che si trova accanto a lui. Ma che cosa succede se inverto l'esperimento e dico all'astronauta

posizionato in cima all'astronave di inviare gli impulsi verso il collega che si trova in basso? Dato che l'astronauta posizionato sul fondo della navicella sta accelerando nella direzione degli impulsi, li riceverà a un ritmo più veloce rispetto al ticchettio del suo orologio. Perciò confermerà che il suo orologio è più lento rispetto a quello posto in cima alla navicella. La situazione è totalmente diversa da quella in cui i due orologi si muovono a velocità costante l'uno rispetto all'altro, nel qual caso entrambi gli astronauti pensano che il loro orologio corra più veloce.



Accelerazione e gravità hanno lo stesso effetto: rallentare l'orologio posto alla base della navicella spaziale Shard.

La conclusione più interessante dell'esperimento si raggiunge quando si sostituisce la gravità all'accelerazione. In forza del principio di equivalenza di Einstein, quale che sia stato l'effetto dell'accelerazione sui due orologi a bordo della navicella, l'effetto della gravità deve essere lo stesso. Perciò, quando posiziono un grosso pianeta sotto la nostra astronave a forma di grattacielo Shard, l'effetto è identico a quello che si avrebbe se la navicella accelerasse: gli orologi sono più lenti alla base del veicolo di quanto non lo siano sulla sua cima.

Poiché il corpo che invecchia è un orologio, ciò significa che voi invecchiate tanto più lentamente quanto più vi trovate vicini al centro della Terra. Le persone che lavorano agli ultimi piani del grattacielo Shard di Londra stanno invecchiando più in fretta di quelli che lavorano al pian terreno. È ovvio che su questa scala le differenze tra le velocità degli orologi sono

estremamente piccole, ma lo scarto diventa significativo se confrontiamo il ticchettio degli orologi atomici siti sulla superficie terrestre con quelli che si trovano a bordo di satelliti in orbita. La differenza di gravità a cui sono sottoposti fa sì che ticchettino a ritmi diversi. E siccome tali orologi sono fondamentali per il funzionamento dei sistemi di posizionamento globale (GPS), è essenziale che si tenga conto degli effetti della gravità sul tempo affinché tali sistemi siano accurati.

Gemelli asimmetrici

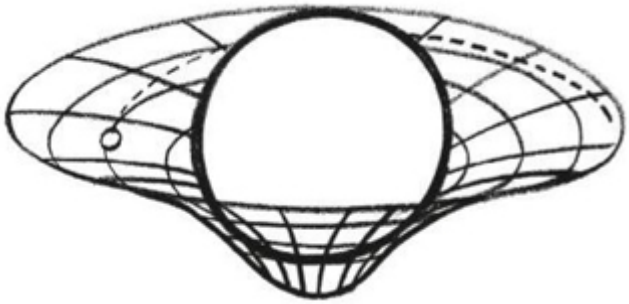
C'è una storia ormai divenuta classica che rivela la bizzarra natura del tempo nel nuovo universo einsteiniano. Riguarda due gemelli, o meglio un gemello che compie un viaggio nello spazio. È una storia che mi sta particolarmente a cuore perché ho due figlie gemelle identiche: Magaly e Ina. Se io inviassi Ina nello spazio su un'astronave che viaggia a una velocità prossima a quella della luce, e poi quell'astronave la riportasse sulla Terra, stando alla fisica della relatività, anche se lei penserebbe di essere stata via solo per dieci anni, l'orologio di sua sorella gemella sarebbe andato molto più velocemente, per cui adesso Magaly avrebbe oltre ottant'anni.

Per comprendere appieno la natura asimmetrica di questa storia devo tener conto di ciò che Einstein ci ha rivelato riguardo all'effetto della gravità e dell'accelerazione sul tempo. Quando Ina viaggia a una velocità costante prossima a quella della luce, la prima rivelazione di Einstein ci dice che nessuna delle gemelle è in grado di dire chi si stia muovendo e chi sia ferma. Ina penserà che l'orologio di Magaly stia andando più piano e Magaly penserà che sia quello di Ina a procedere più lento. Perché allora Ina è più giovane quando ritorna? Perché le due gemelle non hanno la stessa età?

Ina è più giovane quando fa ritorno sulla Terra perché ha dovuto accelerare per raggiungere la sua velocità costante. Analogamente, ha dovuto rallentare e poi accelerare di nuovo nella direzione opposta quando ha invertito la rotta. Sono

queste variazioni di velocità a fare rallentare il suo orologio rispetto a quello della sua gemella rimasta a Terra, che non accelera. È questa asimmetria a far sì che Ina si diriga verso il futuro di Magaly. Se inviassi nello spazio le due gemelle su astronavi che viaggiano in direzioni opposte e le facessi tornare sulla Terra insieme, Ina e Magaly avrebbero sempre la stessa età, mentre tutti gli altri abitanti del pianeta sarebbero invecchiati più velocemente.

La teoria della relatività generale di Einstein ci ha rivelato che anche il tempo, non solo lo spazio, viene deformato dagli oggetti dotati di massa. La gravità è in realtà la distorsione di questa superficie spaziotemporale. Se un oggetto è dotato di massa, esso incurva la superficie. Il modo classico di raffigurarselo è pensare allo spaziotempo come a una superficie bidimensionale e all'effetto della massa come a quello che si ottiene appoggiando una sfera su questa superficie. La sfera spinge la superficie verso il basso creando un affossamento.



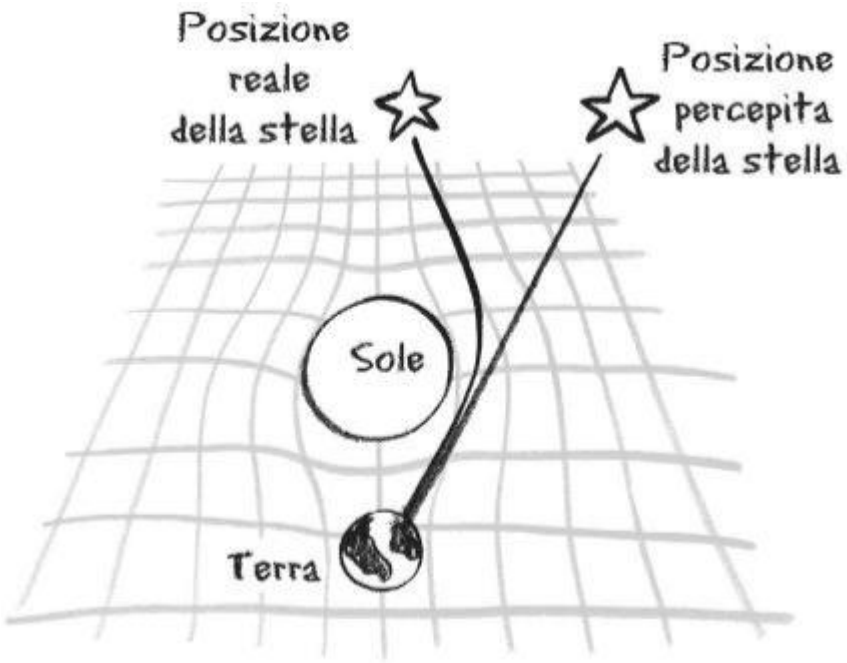
Questa distorsione dello spaziotempo ha un effetto interessante sulla luce. La luce segue il percorso più breve tra due punti, ovvero quella che è, per definizione, una linea retta. Ma adesso stiamo parlando di linee nello spaziotempo, dove la distanza si misura usando la formula di Minkowski, che comprende tanto le coordinate spaziali quanto quelle temporali. La cosa strana è che, quando usiamo la formula di Minkowski, scopriamo che la distanza tra due punti dello spaziotempo si riduce se la luce impiega più tempo ad andare da uno all'altro.

Perciò, per trovare il percorso più breve nello spaziotempo, la luce seguirà una traiettoria che le permetta di trovare un compromesso tra una minimizzazione della distanza percorsa e una massimizzazione del tempo impiegato a percorrerla.

Quando segue una traiettoria di questo tipo, il fotone è sostanzialmente in caduta libera, e dunque l'orologio a bordo della particella di luce andrà più veloce. Quando vi opponete alla forza di gravità, significa che state accelerando e che dunque il vostro orologio rallenta. In definitiva, la teoria di Einstein prediceva che la presenza di un corpo di grande massa avrebbe incurvato la traiettoria della luce. Questa predizione della teoria della relatività generale era assolutamente inattesa, ma poteva essere verificata: lo scenario perfetto per confermare la validità di una teoria scientifica.

Una prova convincente della veridicità di questa rappresentazione dello spaziotempo fu fornita dalle osservazioni della luce proveniente da stelle lontane compiute dall'astronomo inglese Arthur Eddington durante l'eclisse solare del 1919. La teoria prediceva che la traiettoria della luce proveniente da stelle lontane venisse incurvata dall'effetto gravitazionale del Sole. Eddington aveva bisogno dell'eclisse per schermare il bagliore del Sole e poter vedere le stelle nel cielo diurno. Il fatto che la luce pareva effettivamente incurvarsi quando passava accanto a un oggetto di grande massa qual è il nostro Sole fornì la conferma che i percorsi più brevi nello spaziotempo non erano le linee rette della geometria euclidea ma linee curve.

Assistiamo allo stesso effetto sulla superficie terrestre. Un aeroplano che vola da Londra a New York segue una traiettoria incurvata che passa sopra la Groenlandia e non la linea retta che ci aspetteremmo osservando una mappa della Terra. Questa linea curva è il percorso più breve tra i due punti sulla superficie del pianeta. Analogamente, la luce proveniente dalle stelle osservate da Eddington trovava e seguiva il percorso più breve per raggiungere il suo telescopio sulla Terra.



Il 6 novembre 1919, Eddington comunicò i risultati della sua prova sperimentale che confermavano le idee di Einstein. Di lì a pochi giorni, i quotidiani di tutto il mondo divulgavano la grande impresa con titoli a nove colonne. *La teoria di Einstein trionfa: le stelle non sono dove parevano essere ma non c'è da preoccuparsene* annunciò il «New York Times»; *Una rivoluzione della scienza* dichiarò il «Times» di Londra. Anche se oggi siamo abituati all'idea che il bosone di Higgs o le onde gravitazionali facciano notizia, quella fu probabilmente la prima volta in cui a un risultato scientifico fu data una tale pubblicità. Salutato dai giornalisti come il nuovo Newton, lo sconosciuto quarantenne Albert Einstein raggiunse di colpo notorietà internazionale.

Se avete la sensazione che tutto questo deformarsi dello spazio e del tempo vi scombussoli il cervello, non disperatevi. Siete in buona compagnia. Dopo che Arthur Eddington ebbe annunciato la sua scoperta, un collega gli si avvicinò per congratularsi con lui. «Lei deve essere una delle tre persone al mondo che comprendono la teoria di Einstein» gli disse. Poiché Eddington non rispose nulla, il collega insistette: «Suvvia, non c'è bisogno di fare il modesto». «Al contrario» replicò Eddington «stavo cercando di pensare a chi possa essere la terza persona che la comprende.»

Ma il tentativo di stabilire che ne è del tempo quando procediamo a ritroso verso il Big Bang avrebbe messo alla prova persino la comprensione della teoria di Einstein da parte di Eddington.

10

> «Esiste un luogo in cui il tempo è immobile. Le gocce di pioggia sono sospese, immote, nell'aria. I pendoli degli orologi rimangono a mezzo del loro movimento oscillatorio. I cani alzano il muso in un silenzioso ululato. I pedoni sono immobili sulle strade polverose, le gambe piegate come sospese a cordicelle. L'aria è impregnata del profumo dei datteri, dei manghi, del coriandolo, del cumino.»
>
> ALAN LIGHTMAN, *I sogni di Einstein*[1]

Sono molto affezionato al design del mio orologio da polso. Il quadrante è un semplice quadrato marrone situato all'interno di una cassa rotonda d'argento. Mi piace la simmetria della forma, e tuttavia c'è una sottile tensione tra il quadrato e il cerchio. Non è costoso, il che è una buona cosa, dato che ho la tendenza a perdere gli orologi.

Quello precedente mi si sfilò dal polso mentre attraversavo in kayak il lago che si trova ai piedi del ghiacciaio del Monte Cook. Tentai di recuperarlo ma l'acqua era così gelata che non riuscii a lasciarvi immersa la mano per più di un paio di secondi. Non è che non avessi più nulla per misurare il tempo. Il mio orologio era sparito sotto la superficie e presumibilmente oggi i suoi ingranaggi sono arrugginiti e congelati, la sua capacità di segnare l'ora bloccata dalle acque glaciali che scendono dalla montagna.

Se voglio un ambiente che congeli il ticchettio dell'orologio che possiedo oggi, gettarlo nelle singolarità matematiche scoperte all'interno delle equazioni einsteiniane della relatività generale fermerà anche il più robusto degli orologi. Avrò però bisogno di un'astronave, non di un kayak, per esplorare queste singolarità che prendono il nome di buchi neri.

Orizzonti oltre i quali non possiamo conoscere

La ragione per cui l'universo è così affascinante – e non è una distesa uniforme di materia – è che, grazie alla gravità, gli atomi attraggono altri atomi. E così, a meno che tutto non si trovi in uno stato di perfetto equilibrio, assistiamo a un movimento di materia verso altra materia. Ma la cosa interessante della gravità è che l'attrazione esercitata dalla materia diventa più forte quando le distanze si riducono. Questa attrazione porta alla formazione di stelle come il nostro Sole, ma anche alla possibilità che si verifichino eventi più catastrofici nello spaziotempo.

L'atomo più semplice è l'idrogeno, che è costituito da un elettrone e da un protone tenuti insieme dalla forza elettromagnetica. Due atomi di idrogeno si attraggono reciprocamente grazie alla forza di gravità e, man mano che si avvicinano, cominciano a collidere. Se aumentiamo il numero di atomi di idrogeno, le collisioni si faranno sempre più energetiche finché gli atomi non si limiteranno più a rimbalzare uno contro l'altro. A questo punto si instaurano le condizioni necessarie per la fusione nucleare e per la nascita di una stella. Gli atomi di idrogeno si fondono per creare atomi di elio. Tale processo porta a un'emissione di energia, la cui dissipazione produce una pressione verso l'esterno. La vita sulla Terra dipende proprio da questa energia. La stella smette di collassare e rimane in uno stato stabile, dato che l'attrazione gravitazionale diretta verso il centro è controbilanciata dalla pressione rivolta verso l'esterno rilasciata nel processo di fusione.

A un certo punto l'idrogeno della stella si esaurisce. In alcuni casi il processo di fusione continua, con l'elio che va a formare atomi più pesanti, ovvero posizionati più avanti nella tavola periodica degli elementi. Molti degli atomi che troviamo sulla Terra, come quelli del ferro, dell'ossigeno e persino del carbonio che è fondamentale per creare la vita, sono il prodotto della fusione continua di atomi più leggeri all'interno delle stelle. Alla fine la stella non è più in grado di

alimentare questa fusione: il carburante si è esaurito. Allora la gravità prende di nuovo il sopravvento e, mentre la stella ricomincia a contrarsi, entra in gioco la fisica dei quanti. Se io confino le particelle in uno spazio sempre più ristretto, avrò una conoscenza via via più precisa della loro posizione. In forza del principio di indeterminazione di Heisenberg, questa conoscenza deve essere compensata da un'enorme incertezza sulla velocità delle particelle. Il movimento delle particelle che si allontanano le une dalle altre porta a un secondo periodo di stabilità, con l'attrazione di gravità che viene controbilanciata da questo movimento. La stella si trasforma allora in quella che è nota come nana bianca.

Nel 1930, tuttavia, il fisico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar capì che c'era un problema. Bloccato sulla nave che lo portava dall'India a Cambridge, dove avrebbe fatto i suoi studi di dottorato, Chandrasekhar comprese che la relatività speciale poneva un limite alla velocità a cui possono muoversi queste particelle. Perciò, se la massa di una stella è sufficientemente grande, la gravità avrà la meglio su questa velocità massima e la stella continuerà a collassare, creando una regione dello spazio di densità sempre più elevata. I calcoli che fece a bordo della nave lo portarono a concludere che qualsiasi stella con una massa pari a 1,4 masse solari avrebbe subito quel destino. Le supernove responsabili della creazione di elementi quali l'oro e l'uranio sono il risultato di tali collassi catastrofici.

Lo spazio nell'intorno di questi punti di elevata densità subirà una notevolissima deformazione, al punto che la luce rimarrà intrappolata al suo interno senza poterne uscire. Un metodo per farsi un'idea di come le cose possano rimanere intrappolate in questo modo è pensare al lancio di una palla in aria. Sulla superficie terrestre è possibile lanciare una palla a una velocità sufficiente perché fugga all'attrazione gravitazionale del pianeta. La velocità a cui è necessario lanciare la palla è detta velocità di fuga. Ma immaginate di aumentare sempre più la massa della Terra. In tal caso, anche la velocità necessaria per sfuggire alla sua attrazione gravitazionale aumenterà. Alla fine, si raggiungerà un limite oltre il quale la massa terrestre è così grande che la palla

dovrebbe essere lanciata a una velocità superiore a quella della luce per poter sfuggire alla gravità. A questo punto la palla è in trappola. Non può andare oltre una certa altezza prima di ricadere di nuovo al suolo per effetto dell'attrazione terrestre.

Questo ragionamento vale nell'ambito della nostra concezione classica, precedente a Einstein, della gravità. Verso la fine del Settecento Laplace e il fisico inglese John Mitchell avevano già flirtato con l'idea che anche la luce potesse rimanere intrappolata da oggetti dotati di grande massa. Un secolo dopo, tuttavia, la scoperta da parte di Michelson e Morley del fatto che la luce viaggia sempre alla stessa velocità nel vuoto ci fece capire che essa non si comporta come una palla. La gravità non può rallentarla come ipotizzavano Laplace e Mitchell. Ma la nozione di gravità formulata da Einstein come incurvamento dello spaziotempo può ancora portare a un intrappolamento della luce. Le idee di Einstein suggeriscono l'esistenza di una regione di spazio così incurvata che persino la luce (che pur essendo priva di massa subisce comunque gli effetti della curvatura dello spazio) non vi può sfuggire. L'incurvamento dello spazio, insomma, è tale per cui la luce non può trovare una via d'uscita e viene sempre riportata nella regione di alta densità. Nel 1967 il fisico americano John Wheeler affibbiò a queste regioni il nome stravagante di buchi neri. Richard Feynman pensava che quella denominazione fosse oscena: in francese *trou noir* ha altre connotazioni. In ogni caso il nome attecchì.

Quando ci si allontana dal centro di una stella collassata, l'effetto della gravità si riduce. Ciò dà come risultato un confine sagomato come una sfera, con il buco nero al centro, che rappresenta un punto di non ritorno: al di fuori di questa sfera la luce può sfuggire, ma la luce e qualsiasi oggetto che si trovi all'interno di tale confine vi rimarrà intrappolato, dato che non possiede una velocità sufficiente per sfuggirle. Questa sfera è nota come l'orizzonte degli eventi del buco nero, perché chiunque si trovi all'esterno non può essere testimone degli eventi che si verificano al suo interno.

La massa della stella deve essere abbastanza grande per collassare tutta all'interno di questa sfera. Quella della Terra, per esempio, è troppo piccola per creare un buco nero: sarebbe

necessario che si compattasse dentro una sfera dal raggio di appena un centimetro. Anche il nostro Sole non possiede una massa sufficiente: il raggio del suo orizzonte degli eventi sarebbe di tre chilometri soltanto. Ma se la massa della stella è 1,4 volte maggiore di quella del Sole, la pressione centripeta della gravità basterà a controbilanciare qualsiasi pressione centrifuga provocata dall'elevata quantità di moto della materia intrappolata, e l'astro collasserà all'interno del suo orizzonte degli eventi.

I buchi neri sono stati oggetto di un dibattito acceso fin da quando la loro esistenza fu teorizzata dopo che Einstein pubblicò le sue equazioni della relatività generale nel 1915. Alcuni ritenevano che durante la fase di collasso le stelle avrebbero evitato di creare queste regioni senza via d'uscita. Magari la stella avrebbe espulso una parte della sua massa. È una possibilità, ma nel caso di una stella di massa pari a 20 masse solari sarebbe necessaria, per evitare che diventi un buco nero, l'espulsione del 95 per cento della sua massa, il che è improbabile. Nondimeno, alcuni scienziati continuarono a ritenere che queste regioni dello spaziotempo non si sarebbero mai formate.

Nel 1964 fu identificato nella costellazione del Cigno il primo caso potenziale di una di queste regioni di altissima densità. L'oggetto fu battezzato Cygnus X-1 e nel 1971 i calcoli della sua massa e della concentrazione della sua materia portarono all'ipotesi che fosse un buco nero. Non tutti ne erano convinti. Nel 1975 un insigne scienziato scommise che Cygnus X-1 non era un buco nero: Stephen Hawking. Il che appare bizzarro, considerato che egli aveva dedicato gran parte delle sue ricerche a indagare la natura dei buchi neri. Se si fosse appurato che Cygnus X-1 era effettivamente il primo esempio di buco nero, tutte le riflessioni teoriche di Hawking avrebbero trovato una giustificazione.

Come lui stesso ha spiegato in *Dal Big Bang ai buchi neri: breve storia del tempo*, la scommessa era una sorta di polizza di assicurazione. Se scommettessi contro la vittoria della mia squadra del cuore nella finale della Coppa d'Inghilterra ne trarrei comunque un vantaggio: se la squadra per cui tifo perdesse, almeno ne ricaverei un beneficio finanziario.

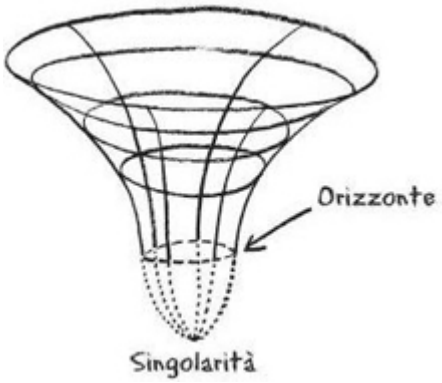
Analogamente, se si fosse scoperto che il suo lavoro di una vita era stata una perdita di tempo, almeno Hawking avrebbe vinto la scommessa. Il premio? Un abbonamento alla rivista satirica «Private Eye» per distrarsi dalle sofferenze causate dal fallimento delle sue ricerche. Fece la scommessa con il collega cosmologo Kip Thorne. Una prova convincente del fatto che Cygnus X-1 fosse effettivamente un buco nero gli avrebbe fatto vincere un abbonamento a una rivista di sua scelta. Thorne optò per «Penthouse».

Nel 1990 c'erano prove sufficienti del fatto che Cygnus X-1 fosse veramente un buco nero: oggi si stima che abbia una massa pari a 14,8 masse terrestri e che sia troppo compatto per essere una stella. Si pensa che il suo orizzonte degli eventi abbia un raggio di 44 chilometri. Dall'interno di questo pallone sferico, il cui diametro si estende quanto la distanza che divide Cambridge da Oxford, la luce non può sfuggire. Dopo aver valutato tutti i dati, Hawking si dichiarò sconfitto. Thorne ottenne l'abbonamento a «Penthouse» con grande disappunto di sua moglie.

Eppure, dal punto di vista matematico, c'è qualcosa di fortemente inquietante in questi buchi neri, qualcosa che contribuì ad alimentare i dubbi sul fatto che potessero effettivamente esistere. Quando la stella collassa, creando punti di elevata densità, sembra che non ci sia nulla che possa contrapporsi alla continua attrazione della gravità. Sembra che la stella sia destinata a contrarsi sempre più, diventando sempre più piccola e sempre più densa, senza che nulla possa impedire l'implosione. Continuerà dunque a collassare fino a creare un punto di densità infinita? L'idea dell'esistenza di questi infiniti fisici incontrava una grande ostilità.

Lo stesso Einstein aveva tentato di dimostrare l'assurdità di una conclusione matematica di quel genere. Eddington capiva che cosa comportasse la matematica della relatività, ma si rifiutava di accettare quelle conseguenze: «Quando dimostriamo un risultato senza comprenderlo – quando emerge imprevisto da un labirinto di formule matematiche – non abbiamo motivo di sperare che sia valido». Ma nel 1964 il matematico oxoniano Roger Penrose dimostrò che quei punti

singolari erano una conseguenza necessaria della teoria della relatività generale.



Un buco nero nello spaziotempo bidimensionale. L'orizzonte degli eventi è un cerchio all'interno del quale la nostra conoscenza non ha accesso.

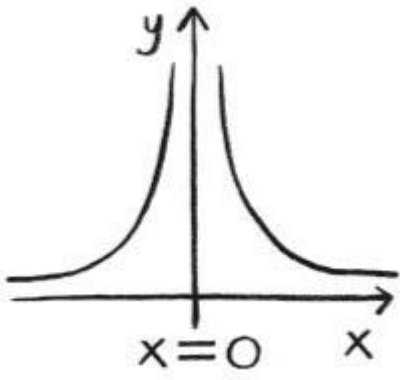
In collaborazione con un giovane Stephen Hawking, Penrose dimostrò che la stessa densità infinita è prevista quando si riavvolge la storia dell'universo fino al momento del Big Bang. Sia i buchi neri sia il Big Bang sono, nel quadro della relatività generale, esempi di un'entità matematica che prende il nome di singolarità. Le singolarità comprendono un'ampia gamma di situazioni in cui è impossibile stabilire che cosa succeda. Una singolarità è un punto in cui la nostra capacità di costruire un modello dello scenario reale sembra venir meno. Un luogo in cui dobbiamo alzare le braccia e dichiarare che la conoscenza ci è preclusa.

Singolarità

Le singolarità sono punti in cui le funzioni matematiche smettono di funzionare. In matematica, una funzione è un po' come il programma di un computer. Si inseriscono dei numeri (input), la funzione esegue alcuni calcoli ed emette una risposta (output). Spesso i matematici danno una rappresentazione visuale delle funzioni attraverso dei grafici. Ogni singolo input è indicato da un numero sull'asse orizzontale e noi segniamo al di sopra di tale asse l'output. Il risultato è una curva.

Consideriamo per esempio la funzione in cui l'input è la distanza da un oggetto di grande massa e l'output è

l’attrazione gravitazionale che l’oggetto di grande massa esercita per i punti posti a una data distanza. Newton comprese che quanto maggiore è la distanza dall’oggetto tanto minore è l’attrazione. Scoprì anzi una relazione precisa tra attrazione e distanza. Se io mi trovo a distanza x dal pianeta, la funzione di Newton stabilisce che l’attrazione gravitazionale è proporzionale a $1/x^2$. Questo è ciò che intendiamo quando parliamo di legge dell’inverso del quadrato. Posso disegnare un grafico di tale funzione.



Il grafico di $y = 1/x^2$. La funzione ha una singolarità in corrispondenza di $x = 1$.

Tuttavia, accade qualcosa di interessante man mano che mi avvicino all’oggetto. La forza d’attrazione aumenta sempre più finché, quando mi trovo alla distanza $x = 0$, l’output diventa infinito e sul grafico non posso segnare alcun valore. Naturalmente nella realtà sto misurando la distanza dal centro di gravità del pianeta e, una volta che ho raggiunto la sua superficie, funzioni e grafici cambiano perché, dopo che ne avrò attraversato la superficie, una parte della massa del pianeta comincerà ad attrarmi nella direzione opposta. Quando raggiungo il centro di gravità del pianeta, tutte le componenti della forza di gravità esercitata su di me si bilanciano e io sperimenterò un’attrazione gravitazionale nulla. Ma che cosa succede se sostituisco il pianeta con un buco nero, ovvero una regione dello spazio in cui tutta la massa è concentrata in un solo punto? Adesso questo punto ha una densità infinita, perciò mi ci posso avvicinare fino a raggiungerlo, e quando l’avrò raggiunto l’attrazione gravitazionale che sperimenterò sarà infinita.

Il fatto che la funzione perda di significato in corrispondenza di $x = 0$ è ciò che i matematici definiscono

singolarità. Esistono singolarità di diverso tipo, ma tutte sono caratterizzate da un punto in cui la funzione non dà un output sensato, oppure dove c'è un salto discontinuo da un valore all'altro.

Un esempio molto casereccio di singolarità si può ottenere prendendo una moneta e facendola roteare su un tavolo. Se non ci fossero né l'attrito del tavolo né la resistenza dell'aria, la moneta ruoterebbe per sempre a una velocità costante. Tuttavia, poiché in realtà l'energia viene dissipata, la moneta non rotea per sempre. Al contrario, l'angolo tra la moneta e il tavolo diminuisce e succede una cosa interessante: la velocità di rotazione della moneta aumenta in proporzione. Man mano che l'angolo si approssima a zero, la velocità continua ad aumentare fino a diventare infinita. Nelle ultime fasi della rotazione la moneta vibra emettendo un ronzio la cui frequenza cresce rapidamente, finché la vibrazione non si interrompe.

Le equazioni del moto ci dicono che la velocità di rotazione della moneta aumenta a un tasso tale per cui raggiunge un valore infinito dopo un tempo finito. È per questo che sentiamo aumentare la frequenza del suono emesso. La moneta che rotea è un esempio di singolarità. Naturalmente ci sono altri effetti che intervengono impedendo che questo infinito matematico si realizzi nella sua interezza, ma l'esempio ci rivela che non è necessario scomparire dentro un buco nero perché le equazioni della fisica producano valori infiniti.

Persino le equazioni newtoniane del moto planetario possono produrre singolarità. Come ho spiegato alla fine del Primo Confine, il matematico Zhihong Xia scoprì che quattro pianeti possono essere disposti in modo tale per cui un quinto pianeta venga espulso dal sistema e raggiunga una velocità infinita dopo un lasso di tempo finito. Le equazioni non ci dicono nulla sul destino del pianeta una volta che abbia raggiunto questa singolarità astronomica.

Le singolarità sono di regola momenti in cui compaiono dei valori infiniti e oltre i quali è impossibile fare predizioni. Non è solo nell'ambito della fisica che tali singolarità possono emergere. C'è un esempio famoso pubblicato nel 1960 da

Heinz von Foerster, Patricia Mora e Lawrence Amiot, che predice una grave singolarità qui sulla Terra. Il tasso demografico di crescita, se mantenesse lo stesso andamento che ha manifestato fino al 1960, porterebbe la popolazione terrestre a diventare infinita il 13 novembre 2026. Guarda caso un venerdì, nel caso siate superstiziosi.

Secondo il modello più semplice, una popolazione cresce in maniera esponenziale. Per esempio, la popolazione di una data specie potrebbe raddoppiare ogni 50 anni. Applicando questo modello, una popolazione esplode rapidamente ma non diventa mai infinita. Tuttavia, l'analisi sui dati precedenti compiuti dagli autori della pubblicazione indicava che il periodo di tempo necessario alla popolazione umana per raddoppiare stava accorciandosi sempre più.

La popolazione aveva impiegato 1650 anni par passare da 250 milioni nell'anno 0 a 500 milioni nel 1650. Aveva raggiunto il miliardo 200 anni dopo, ovvero nel 1850. Per il raddoppiamento successivo erano bastati 80 anni. La popolazione ha raggiunto i 4 miliardi nel 1976, dopo soli 46 anni. Il tasso di crescita è più rapido di un tasso esponenziale. Perciò, nel 1960, con i dati di cui disponevano, i tre ricercatori stimarono che la popolazione della Terra raggiungerà una singolarità più o meno tra una decina d'anni a partire da oggi.

Un altro esempio di questa crescita superesponenziale è fornito dall'aumento della potenza di calcolo dei computer. La cosiddetta legge di Moore afferma che la potenza di calcolo dei computer raddoppia ogni 18 mesi. Con un siffatto tasso di crescita, pur aumentando spaventosamente, la potenza dei computer non diverrà mai infinita. Ma altri hanno suggerito che, proprio come il tempo necessario alla popolazione umana per raddoppiare sembra abbreviarsi, lo stesso andamento accelerato si applichi alla tecnologia. La prospettiva di raggiungere una singolarità tecnologica ha dato vita a un movimento chiamato «della Singolarità». L'idea, resa popolare dall'inventore e futurologo Ray Kurzweil nel libro *La singolarità è vicina*, è che l'umanità raggiungerà questa singolarità tecnologica entro il 2045. A quel punto, secondo Kurzweil, gli uomini saranno in grado di creare un'intelligenza artificiale superiore alla nostra. L'evento sarà accompagnato

da un'interruzione della nostra capacità di prevedere come sarà la vita dopo il sopraggiungere di una siffatta singolarità.

Bisogna esercitare prudenza quando si maneggiano le equazioni matematiche, perché potrebbe esserci qualche elemento nascosto che fa sentire i suoi effetti solo quando ci avviciniamo alla singolarità e che a quel punto assumerà un ruolo importante nell'impedire che questo valore infinito si realizzi realmente. È quello che accade in modo evidente nel caso della crescita della popolazione umana, dato che l'estensione finita della superficie terrestre, una volta raggiunta una certa soglia, vi porrà un limite.

Fattori analoghi potrebbero entrare in gioco nel caso del Big Bang e dei buchi neri. Qualcuno ha suggerito che le equazioni della relatività generale non si applichino in queste situazioni estreme. Per esempio, è possibile che sia necessario introdurre un termine ulteriore nelle equazioni einsteiniane per la gravità che faccia sentire il suo effetto sulle equazioni solo quando ci si avvicina alla singolarità. In tal caso si modificherebbe ciò che accade in prossimità della singolarità del Big Bang, ma la componente extra risulterebbe praticamente impossibile da rilevare prima di giungere a tali condizioni estreme. È un po' come la sottile modifica che Einstein dovette introdurre nelle equazioni del moto per il caso di oggetti che viaggiano a velocità prossime a quella della luce; a velocità ridotte, è sufficiente sommarne i valori, ma Einstein comprese che quando ci si avvicina alla velocità della luce bisogna fare maggiore attenzione. Come ho spiegato nel capitolo precedente, la formula per determinare la velocità di un uomo che corre su un treno rispetto alla banchina si ottiene sommando la velocità dell'uomo e quella del treno; poi però è necessario dividere il risultato per una seconda formula. Nel caso di basse velocità, la seconda formula dà un risultato così prossimo a 1 che il suo effetto è impercettibile, che è poi il motivo per il quale prima di Einstein gli scienziati ritenevano bastasse sommare le velocità. Ma quando le velocità sono prossime a quelle della luce, prende il sopravvento un comportamento diverso. La stessa cosa potrebbe succedere in prossimità del Big Bang o di un buco nero. Le equazioni della relatività generale potrebbero necessitare di un termine extra

che entra in gioco solo quando la gravità assume valori estremi.

Ma se l'universo li contiene davvero, quale effetto hanno questi punti singolari di densità infinita sul tempo? Einstein scoprì che un aumento della gravità rallenta il tempo. Che cosa succede dunque al mio orologio quando mi avvicino a questi punti in cui la gravità raggiunge valori estremi?

L'ignoto che si cela in un buco nero

Se getto il mio orologio dentro un buco nero, avviene qualcosa di strano. Se rimango sulla Terra e osservo il mio orologio mentre cade verso il buco nero, c'è un momento in cui il tempo sembra fermarsi. L'orologio diventa sempre più lento finché non cessa di ticchettare. Alla fine l'immagine del mio orologio si blocca, poi scompare. L'orizzonte degli eventi che circonda un buco nero è come una bolla nello spazio oltre la quale il tempo sembra interrompersi. Non può proseguire. Dalla mia prospettiva esterna al buco nero, il tempo non ha un dopo. È possibile che ciò sia l'opposto di quello che accade al tempo quando risaliamo all'indietro fino al Big Bang, quando il tempo non aveva un prima?

Dovete però ricordare che questo è ciò che vedo dalla mia prospettiva, quando metto a confronto il tempo sulla Terra con il tempo che osservo sul mio orologio mentre si dirige verso il buco nero. Quale aspetto assumerebbero le cose se indossassi il mio orologio al polso e viaggiassi anch'io verso quella singolarità matematica? In tal caso la mia esperienza sarebbe molto diversa. Dalla Terra, quando l'orologio incontrava l'orizzonte degli eventi del buco nero, sembrava che cessasse di ticchettare. Ma dalla mia nuova prospettiva, nel momento in cui attraverso l'orizzonte degli eventi sembra che il mio orologio continui a funzionare senza problemi. Anzi, quando varcherò quella linea di non ritorno, non sarò in grado di rendermene conto.

Non voglio dire che per me vada tutto bene mentre cado nel buco nero, perché a ciò che succede allo spaziotempo man

mano che mi approssimo a quel centro infinitamente denso non è facile porre rimedio. Mentre mi avvicino al centro del buco nero con i piedi in avanti, la gravità esercita un'attrazione maggiore sulle mie estremità che sulla mia testa, con il risultato che il mio corpo si allungherà fino a essere «spaghettificato». In un periodo finito tutto verrà triturato dentro la singolarità, compreso il mio orologio, e il tempo avrà termine. Come una linea tracciata di traverso su una pagina, il tempo raggiungerà il limite e non potrà proseguire da nessun'altra parte.

È strano che altrove il tempo sembri continuare a ticchettare incurante di tutto. Immagino che un destino simile aspetti tutti noi. Quando moriamo, per noi il tempo si ferma, ma sappiamo che altrove continuerà a scorrere a nostra insaputa. Così come non posso avere esperienza della mia morte, non avrei esperienza del fatto di giungere in una singolarità dello spaziotempo.

Nel caso in cui mi capitasse di scivolare dentro un buco nero, un amico fisico mi ha offerto qualche consiglio. Come quando si finisce nelle sabbie mobili, la miglior cosa da fare è rinunciare a lottare. Se mi lascio andare in caduta libera verso il mio destino, sopravvivrò più a lungo. Sembra un controsenso, ma l'amico fisico mi ha ricordato ciò che succede al mio orologio sotto gli effetti della gravità e dell'accelerazione. Se lottassi, cercando di accelerare per allontanarmi dalla singolarità, scoprirei che il tempo scorre più lento nel punto in cui mi trovo. Un aumento dell'accelerazione, come la gravità, rallenta gli orologi. E così finirei per correre più velocemente verso il futuro dello spaziotempo che mi circonda (ricordate l'esempio di mia figlia Ina, che accelerando finiva di gran carriera nel futuro di sua sorella gemella Magaly). Perciò, se arrivo alla singolarità lottando per non finirci dentro, sarò invecchiato un po' meno, ma non ne trarrò un gran vantaggio: finirò distrutto dentro la singolarità dopo aver vissuto una porzione minore della vita. Dunque è molto meglio non lottare e godersi quanto più tempo è possibile prima di incontrare la singolarità.

La cosa interessante è che coloro che si trovano all'esterno dell'orizzonte degli eventi non sapranno mai che cosa succede

al suo interno. Dalla loro prospettiva, il tempo sembra fermarsi nel momento in cui io oltrepasso l'orizzonte degli eventi, né hanno modo di sapere che cosa mi accada poi, sebbene per me esista un poi, mentre proseguo verso la mia spaghettificazione. Chiedersi che cosa accada in seguito sembra dunque una domanda sensata, una domanda che ha una risposta. L'unico problema è che se vi trovate al di fuori dell'orizzonte degli eventi le leggi della fisica vi negheranno accesso alla risposta.

Si riteneva che lo stesso principio si applicasse al problema di sapere che cosa accadeva prima del Big Bang, ammesso che qualcosa accadesse. All'interno di un buco nero il tempo termina. Ma il Big Bang è come il collasso di una stella che si svolge all'incontrario. Perciò dovrei dedurne che il tempo termina anche se mi dirigo a ritroso verso il Big Bang. In altre parole, dovrei concluderne che il tempo ha un inizio, che il tempo stesso inizia con il Big Bang.

Le singolarità dello spaziotempo sono confini, punti in cui mi imbatto in una fine e non posso più proseguire. L'idea di un confine dello spaziotempo è difficile da comprendere: per quanto mi sia proibito proseguire oltre, mi rimane la convinzione che debba esserci qualcosa al di là di quel confine.

Non solo i buchi neri mettono in dubbio il nostro concetto di tempo; sembrano anche contraddire un'altra scoperta della fisica moderna, cioè il fatto che l'informazione non vada mai perduta.

Il tritacarta supremo

C'è una conseguenza decisamente straordinaria delle leggi della fisica dei quanti, vale a dire il fatto che esse sono reversibili. Ciò significa che l'informazione non va mai persa. Per esempio, se io mi abbonassi a «Private Eye» e a «Penthouse» e bruciassi sul fuoco un'intera annata di entrambe le riviste, sembrerebbe impossibile che io possa stabilire a quale rivista corrisponda l'uno o l'altro dei due mucchietti di cenere che otterrei.

Eppure, ammesso di avere informazioni complete su tutti gli atomi e su tutti i fotoni coinvolti nel mio falò, in linea teorica è possibile ripercorrere il processo all'inverso e recuperare le informazioni contenute nelle riviste. Farlo in pratica sarebbe ovviamente molto difficile, ma la scienza afferma che non c'è nulla che sia irreversibile nel processo. Le leggi della fisica operano nei due sensi.

L'esistenza dei buchi neri sfida quest'idea. Se getto una rivista in un buco nero e l'altra in un altro buco nero, mi sarà impossibile scoprire quale rivista è finita nell'uno e quale nell'altro. Sembra che i buchi neri siano i tritacarta supremi, in cui le informazioni vanno definitivamente perdute.

I buchi neri hanno un ruolo particolarmente interessante nella mia ricerca di ciò che non possiamo sapere, poiché quando qualcosa sparisce dentro l'orizzonte degli eventi – il confine oltre il quale la luce rimane intrappolata – sembra che io perda effettivamente le informazioni su ciò che lo ha attraversato. Se prendo il dado da gioco che ho portato con me in questo viaggio e lo getto dentro il buco nero, una volta che avrà oltrepassato l'orizzonte degli eventi io non potrò mai sapere l'esito del lancio. Dall'altro lato dell'orizzonte potrebbe esserci una scrivania su cui il dado atterra dando come risultato 6. Una persona che si trovi là potrebbe assistere all'evento ma non sarebbe mai in grado di comunicarne il risultato perché ogni cosa è intrappolata all'interno dell'orizzonte.

Secondo la fisica della relatività generale, le sole cose che posso conoscere su di un buco nero restandone all'esterno sono la sua massa, il suo momento angolare e la sua carica elettrica. Ogni altra informazione è persa. Questo fatto prende il nome piuttosto colorito di teorema *no-hair* (letteralmente, teorema «senza capelli»), alla cui base c'è l'idea di rappresentare qualsiasi informazione ulteriore come peluria sulla superficie sferica e liscia di un buco nero. Potrei gettarvi dentro il mio dado, il mio violoncello e il mio orologio da polso; una volta che avranno oltrepassato l'orizzonte degli eventi, non ci sarà nulla di relativo al buco nero che mi possa fornire indizi su ciò che vi ho gettato. Non c'è modo di

riavvolgere il nastro degli eventi per vedere che cosa ha attraversato l'orizzonte.

Benché la si definisca un teorema, sarebbe più corretto chiamare questa conclusione una congettura, poiché non esiste una prova definitiva del fatto che l'informazione vada realmente persa dentro un buco nero. Anzi, nel 1974 furono sollevati dubbi sulla capacità dell'orizzonte degli eventi di mascherare del tutto ciò che si verifica all'interno di un buco nero. E questo perché, secondo Stephen Hawking, i buchi neri fanno acqua.

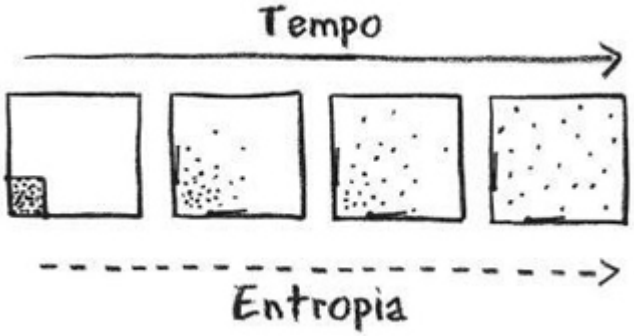
Buchi neri non così neri

Una volta che il mio dado è stato gettato dentro un buco nero, sembra che non ci sia alcun procedimento che ci permetta di sapere l'esito del lancio. O almeno molti pensavano che le cose stessero così a causa dell'incurvamento dello spaziotempo prodotto da una massa estremamente concentrata. Ma quando Hawking vi applicò la seconda legge della termodinamica, scoprì che i buchi neri non erano neri come tutti avevano immaginato.

La seconda legge della termodinamica afferma che stiamo andando da un universo estremamente ordinato verso un universo caratterizzato da un disordine sempre maggiore. Quello che sta cambiando è l'entropia del sistema, che è una misura del disordine. In buona sostanza quantifica il numero di differenti scenari possibili, il quale a sua volta misura la probabilità che uno di questi scenari si realizzi. E il secondo principio della termodinamica stabilisce che l'entropia dell'universo sta aumentando.

Un esempio classico di questo aumento dell'entropia è dato da un gas intrappolato all'interno di un contenitore. Se il gas è concentrato in un angolo (immaginate che sia stato compresso in quell'angolo da pareti mobili interne al contenitore che poi sono state rimosse), col tempo si distribuirà in tutto il contenitore. L'entropia conteggia il numero di scenari diversi possibili per il gas. Quando il gas è intrappolato nell'angolo,

gli scenari possibili sono in numero inferiore rispetto a quando si rimuovono le pareti interne e il gas è libero di andare a occupare l'intero contenitore. L'entropia inizia con un valore basso e poi cresce all'aumentare del numero di possibili scenari.



Oppure pensate a un esempio tratto dalla vita quotidiana: un uovo che cade dal tavolo e si rompe sul pavimento. Il guscio, caratterizzato da una struttura altamente ordinata, si trasforma in una massa di frammenti sparsi qua e là. Ci sono molte più configurazioni possibili dei frammenti di quante non ce ne fossero quando il guscio era un unico oggetto integro che circondava l'uovo. Se guardassimo un video di questo scenario facendolo procedere avanti e a ritroso, ci sarebbe immediatamente chiaro quale delle due direzioni rappresenta il reale flusso del tempo. L'aumento dell'entropia ci permette di individuare la freccia del tempo.

Ed è questo il motivo per cui l'entropia è intimamente legata al concetto di tempo. È una delle poche cose che ci aiutano a capire in quale verso andrebbe riprodotto il filmato. Molte altre leggi della fisica funzionano alla perfezione sia che le si esegua in avanti o all'indietro. Sebbene sia fisicamente possibile che un uovo sfracellato sul pavimento si ricomponga da sé e risalga sul tavolo, la diminuzione dell'entropia che un tale scenario comporta è un'indicazione di quanto sia improbabile che quest'evento si verifichi.

C'è però una questione interessante relativa all'origine dell'ordine che caratterizza l'uovo. Probabilmente pensate che la transizione dall'ordine al disordine dettata dalla seconda legge della termodinamica non si manifesti sulla Terra. In fondo, ci siamo evoluti a partire da una brodaglia indifferenziata fino a raggiungere uno stato in cui abbiamo vita

e uova e ordine. Quest'apparente violazione della seconda legge delle termodinamica trova soluzione nel fatto che la Terra acquisisce bassa entropia da un'altra fonte; che c'è in atto uno scambio. I fotoni provenienti dal Sole, che costituiscono la sorgente della vita qui sul nostro pianeta, possiedono una bassa entropia. Tuttavia, invece di aumentare la propria temperatura quando è investita dai fotoni solari, la Terra irradia calore tramite onde elettromagnetiche di frequenza (e dunque di energia) minore ma in numero maggiore rispetto a quelle che la investono.

Insomma, poche onde di alta energia provenienti dal Sole vengono convertite in molte onde di bassa energia emesse dalla Terra. Questo aumento del numero di radiazioni comporta un aumento del numero di scenari possibili per la loro emissione. Il processo assomiglia in qualche modo a quello dell'uovo che va in pezzi. In tale analogia, un singolo fotone di alta energia assorbito dalla Terra è come l'uovo che cade al suolo e i tanti fotoni di bassa energia emessi dalla Terra dopo aver assorbito quel fotone energetico sono come i frammenti del guscio d'uovo. Da questo scambio, la Terra ottiene una diminuzione della propria entropia ed è per questo motivo che osserviamo l'ordine emergere dal caos sul nostro pianeta. Ma se consideriamo il sistema costituito da Terra e Sole, l'entropia complessiva aumenta in ossequio al dettato della seconda legge della termodinamica.

Che cosa accade dunque a un contenitore di gas quando lo gettiamo in un buco nero? O – ed è questa una domanda più interessante – che cosa accade alla sua entropia? Se sto al di fuori dell'orizzonte degli eventi, dovrei perdere accesso a ogni conoscenza su ciò che si verifica al suo interno. L'entropia del contenitore va perduta? In tal caso ci sarebbe una diminuzione dell'entropia globale, in contraddizione con la seconda legge della termodinamica. Forse dovremmo pensare che il buco nero possegga una propria entropia, che aumenta ogni volta che qualcosa finisce risucchiato dentro la singolarità. Ma non avendo idea di ciò che si verifica dentro il buco nero, è stato ipotizzato che la sua entropia sia proporzionale all'area della superficie della sfera che costituisce l'orizzonte degli eventi, un valore che siamo in grado di conoscere e calcolare. Tutto

perfetto, ma la fisica ci dice che qualsiasi cosa possieda entropia ha una temperatura non nulla, e che qualsiasi cosa possieda una temperatura non nulla irradia inevitabilmente calore. Sembra dunque che i buchi neri debbano emettere radiazione in misura inversamente proporzionale alla massa che contengono. Se emettono radiazione, d'altronde, non sono neri come il loro nome suggerisce, e dovrebbero effondere un debole bagliore nel cielo notturno.

Confini indefiniti

Questo non ha senso. Com'è possibile che il buco nero emetta radiazione se tutto, compresa la luce, dovrebbe rimanere intrappolato al suo interno? Sembra proprio che non esista un processo atto a far sì che ciò accada. Almeno finché Hawking non cambiò la prospettiva introducendo un po' di fisica quantistica. Secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg, l'orizzonte degli eventi non è così definito come prevede la teoria della relatività generale. Come abbiamo visto nel Terzo Confine, dal principio d'indeterminazione consegue che non è possibile conoscere con precisione posizione e quantità di moto contemporaneamente. Analogamente, tempo ed energia sono correlati in modo tale per cui non siamo in grado di conoscere l'uno e l'altra insieme. Perciò, non è possibile avere un vuoto perfetto in cui tutto è azzerato. Se tutto fosse zero, conoscerei tutto con assoluta precisione.

Il vuoto è soggetto a fluttuazioni quantistiche, cosicché, per esempio, vi possono apparire una particella e un'antiparticella, una dotata di energia positiva e l'altra di energia negativa. È possibile che sia stato questo meccanismo di creazione di qualcosa dal nulla e far partire l'universo. In genere, nello spazio vuoto, una particella e un'antiparticella si annichileranno a vicenda in un tempo estremamente breve. Ma se una tale coppia si dovesse formare in modo tale per cui la particella dotata di energia positiva si trovi all'esterno dell'orizzonte degli eventi di un buco nero e la particella dotata di energia negativa rimanga intrappolata all'interno dell'orizzonte, si verificherebbe una cosa interessante.

Ciò che avremmo è un effetto assai bizzarro: la particella all'interno viene risucchiata nel buco nero, mentre la particella dotata di energia positiva sembra qualcosa che il buco nero irradia. In sostanza, il buco nero emanerebbe un bagliore. La sua temperatura non sarebbe nulla, proprio come ci aspetteremmo se avesse un'entropia positiva.

Un momento, però. Nella metà dei casi la particella dotata di energia positiva finisce per ritrovarsi all'interno dell'orizzonte invece che all'esterno. Ciò non porterebbe a un aumento della massa del buco nero? In realtà le cose non stanno così, poiché una particella dotata di energia negativa che si trovi all'esterno dell'orizzonte degli eventi non possiede l'energia per andarsene, di modo che l'effetto globale di queste fluttuazioni casuali assomma a una diminuzione complessiva della massa del buco nero nel tempo.

L'emissione di radiazione di Hawking, come è stata battezzata, è stata individuata in tutti i buchi neri identificati fino a oggi. Il guaio è che, stando a quanto ci dice la matematica, la velocità di tale emissione deve essere inversamente proporzionale alla massa del buco nero. Perciò un buco nero con una massa pari a molte masse solari emetterà radiazione a un tasso così lento che la sua temperatura risulterà inferiore a quella delle microonde che costituiscono la radiazione cosmica di fondo, e di conseguenza è impossibile individuarla in mezzo al rumore lasciato dal Big Bang.

La conseguenza sorprendente dell'ipotesi formulata da Hawking era data dal fatto che forniva un meccanismo attraverso cui i buchi neri si dissolvono, riducendosi di massa con il passare del tempo. Man mano che la massa diminuisce, aumenta la radiazione, con il risultato che alla fine i buchi neri spariranno con uno scoppio, o almeno così si ritiene. Secondo Hawking, questo scoppio è decisamente imponente: equivarrebbe all'esplosione di milioni di bombe a idrogeno. Altri ritengono che sia più simile allo sparo di un proiettile d'artiglieria.

Comunque sia, rimaniamo con un enigma. Dov'è finita l'informazione gettata dentro un buco nero? Posso accettare il fatto che quell'informazione sia intrappolata all'interno del

buco nero; quantomeno esiste. Ma se alla fine il buco nero scompare, significa che l'informazione svanisce insieme a esso? Oppure è codificata in qualche forma nella radiazione emessa dalla singolarità? Lanciando il mio dado da gioco dentro il buco nero, è possibile che io risalga in un modo o nell'altro all'esito del lancio grazie alle particelle emesse in corrispondenza dell'orizzonte degli eventi? Forse, come nel caso delle riviste bruciate, esiste in teoria un metodo per districare questa radiazione e recuperarne le informazioni relative a tutto ciò che scompare oltre l'orizzonte degli eventi. L'enigma relativo alla scomparsa dell'informazione prende il nome di paradosso dell'informazione del buco nero.

Nel 1997 Hawking fece un'altra scommessa, questa volta con il fisico teorico del Caltech John Preskill, mentre nell'occasione Kip Thorne prese le sue parti. Hawking e Thorne erano convinti che quella perdita di informazione fosse inevitabile. Preskill, tuttavia, non era disposto ad ammettere che l'informazione andasse perduta, dato che ciò sarebbe stato in contraddizione con la teoria quantistica. Invece di un abbonamento a una rivista, il vincitore della scommessa avrebbe ricevuto un'enciclopedia di propria scelta. Non era una decisione casuale: se la si fosse gettata dentro un buco nero, le informazioni in essa contenute avrebbero potuto essere codificate in qualche forma nelle nuove particelle emesse dal buco nero in forza del principio di indeterminazione?

Nel 2004 Hawking dichiarò enfaticamente di aver perso la scommessa. Preskill si aggiudicò *Total Baseball: The Ultimate Baseball Encyclopedia*. «Ho regalato a John un'enciclopedia sul baseball» scherzò in seguito Hawking parlando dell'episodio «ma forse avrei dovuto regalargli le ceneri dell'enciclopedia.»

Oggi Hawking ritiene che l'informazione che finisce in un buco nero sia codificata sulla superficie dell'orizzonte degli eventi da cui è circondato il buco nero per poi essere impartita alle particelle emesse. Tale superficie è bidimensionale, eppure, bizzarramente, sembra codificare informazioni relative allo spazio tridimensionale che si trova al suo interno. Ciò ha portato alla formulazione del concetto di universo olografico, secondo cui l'intero nostro universo tridimensionale è in realtà

la proiezione di informazioni contenute su una superficie bidimensionale. Se Hawking ha ammesso di aver perso la scommessa con Preskill, Thorne rimane della sua idea e crede ancora che l'informazione si perda.

Anche Roger Penrose, come Kip Thorne, pensa che Hawking si sia dato per vinto troppo presto. Secondo Penrose, una volta che un buco nero si è dissolto emettendo radiazione, informazione ed entropia vanno perdute. Per lui tutto questo assume particolare rilevanza in relazione alla questione del perché l'universo abbia avuto inizio in uno stato di bassa entropia. Per quale ragione da principio c'era ordine, ovvero la condizione necessaria perché la seconda legge della termodinamica potesse valere fin da subito? Da dove veniva quell'ordine primordiale? Se i buchi neri distruggessero effettivamente l'informazione, potrebbero fornire un meccanismo per riportare l'universo a uno stato di bassa entropia.

Penrose è sempre stato convinto del fatto che il Big Bang rappresenti un confine invalicabile per la fisica. Quando ci dirigiamo a ritroso nel tempo fino a raggiungere la singolarità del Big Bang, le equazioni della fisica non valgono più. Accettando la descrizione del Big Bang come un punto di densità infinita, sotto molti punti di vista chiedersi che cosa accadesse prima non ha senso: le leggi della fisica potrebbero portare a qualsiasi conclusione dall'altro lato di questa singolarità. Analogamente, non sarebbe possibile misurare nulla che giaccia al di là di essa. Di conseguenza, siamo autorizzati a trattare tutto ciò che precede il Big Bang come se non esistesse. O forse no? Su questo punto Penrose ha cambiato idea.

Unire il passato e il futuro

Oggi stanno emergendo alcune versioni di quanto potrebbe essere accaduto prima del Big Bang, ed è proprio Penrose a raccontare una delle più straordinarie proponendo l'idea che il Big Bang non sia stato un evento unico ma faccia parte di un

ciclo infinito di Big Bang. Non è la prima volta che una simile possibilità viene suggerita: quando si pensava che l'evoluzione dell'universo si sarebbe conclusa in un *big crunch*, parve una buona idea trasformare quel «grande collasso» nel Big Bang che avrebbe inaugurato una nuova era.

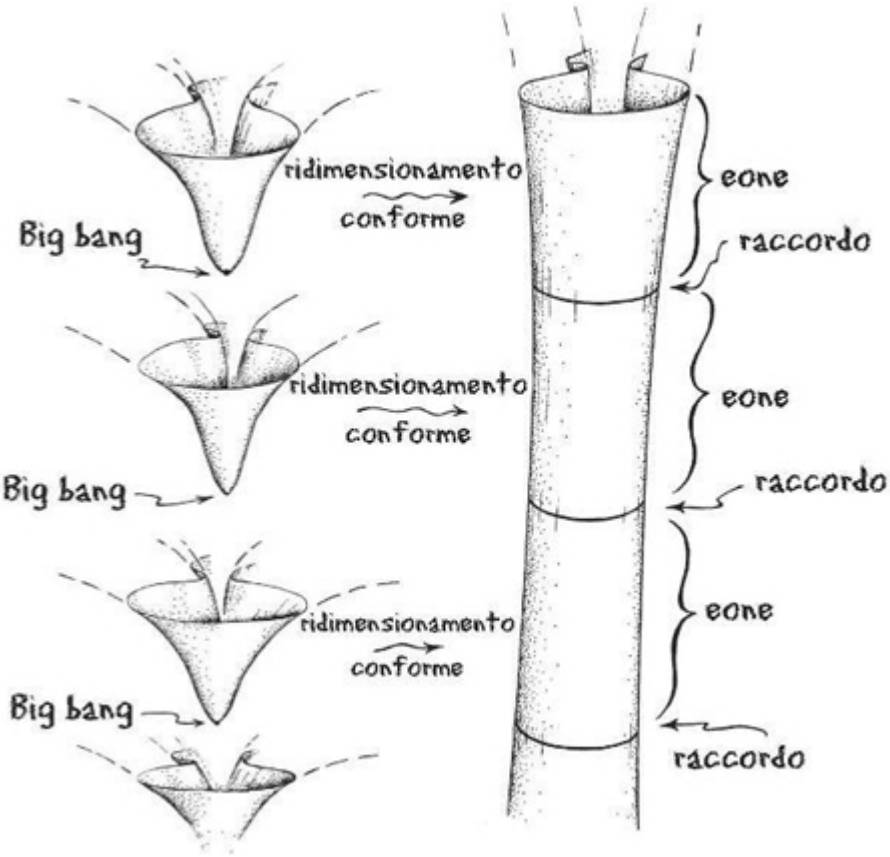
Ma come ho scoperto nel Quarto Confine, l'universo, lungi dal contrarsi, si sta espandendo a una velocità sempre maggiore, e si dirige verso uno stato di morte termica in cui non ci sarà vita, né esisteranno galassie e nemmeno materia, ma solo fotoni di luce. È quella che Penrose chiama «l'era della grande noia». Si ritiene che persino i buchi neri che inghiottiranno buona parte delle galassie oggi visibili emettano radiazione, e perciò anch'essi si consumeranno, evaporando in uno scoppio finale e lasciando un universo popolato solo da fotoni e gravitoni, le ipotetiche particelle prive di massa che si ritiene siano i mediatori della forza di gravità.

Penrose ha ammesso di sentirsi piuttosto depresso di fronte a questa visione del futuro del nostro universo: «Buon Dio, è questo che ci aspetta?» Poi però si è chiesto chi avrebbe potuto essere testimone di quell'«insopportabile tedio finale». Certamente non noi. Le uniche entità che potrebbero esserne gli annoiati testimoni sarebbero i fotoni e i gravitoni che da soli costituirebbero l'intero universo.

Ma il fotone non possiede un concetto del tempo. Vive in un ambiente senza tempo. Quando le cose si approssimano alla velocità della luce, la relatività comporta che il tempo rallenti, al punto che nel momento in cui viene raggiunta la velocità della luce gli orologi si fermano. Il fatto è che la luce *viaggia* alla velocità della luce, vale a dire che un fotone non possiede un concetto del tempo. In effetti, nello scenario immaginato da Penrose in cui tutte le particelle dotate di massa avranno subito un decadimento riducendosi a fotoni e gravitoni, non rimarrà più nulla per segnare il tempo, nulla con cui costruire un orologio. Analogamente, dato che il tempo è essenziale per misurare lo spazio, quest'universo futuro avrà perduto la capacità di quantificare e di misurare le distanze: i concetti di grande e di piccolo saranno privi di significato.

Invece di abbandonarsi al pessimismo, in questo scenario Penrose ha intravisto un'opportunità. Non c'era una somiglianza notevole con lo stato dell'universo subito dopo il Big Bang, ovvero di un universo pieno d'energia ma in cui non s'era formata ancora materia? D'accordo, quell'energia avrebbe dovuto essere concentrata in una regione infinitamente piccola, creando così le condizioni per il verificarsi del nuovo Big Bang. Ma se nel futuro il nostro universo avrà perduto ogni senso delle dimensioni, allora le condizioni in cui si troverà alla fine della sua storia non potrebbero essere il punto di partenza per un nuovo Big Bang, così che l'universo che ne emergerà si sia ridimensionato in modo da concentrare l'energia in un nuovo punto d'inizio?

Questi due scenari – l'universo che finisce in una noiosa morte termica e l'universo che prende avvio da un eccitante Big Bang – possono effettivamente fondersi senza discontinuità, come due paesaggi i cui confini combaciano per creare un unico paesaggio continuo. Per cucire insieme questi due scenari è necessario che la fine di un universo si contragga e l'inizio dell'altro si espanda, di modo che le due estremità si adattino a vicenda e il passaggio dall'uno all'altro avvenga in modo perfettamente uniforme; che i freddi fotoni separati da grandi distanze diventino i caldi fotoni ravvicinati che innescano un nuovo Big Bang.



Riportando le dimensioni dell'universo alla fine di un eone a quelle dell'inizio di un altro universo, possiamo passare senza soluzione di continuità dall'uno all'altro.

La teoria di Penrose è controversa, e non ho trovato molti scienziati disposti a pensare che fosse qualcosa di più di un'ingegnosa idea matematica. Eppure quando lo stesso autore rivelò per primo che la matematica della relatività generale prediceva l'esistenza di singolarità della spaziotempo, molti scartarono quell'idea considerandola impossibile dal punto di vista fisico. Forse la sua attuale teoria dei cicli del tempo si dimostrerà errata, ma per me c'è qualcosa di entusiasmante in uno scienziato che si ricrede sulla possibilità di esplorare il tempo prima del Big Bang.

Penrose ha battezzato eone il periodo che intercorre tra un Big Bang e il successivo, e nel suo modello il nostro eone è solo uno di un numero forse infinito di eoni che l'hanno preceduto e lo seguiranno.

Una grossa difficoltà con cui si scontra questo modello, così come molti altri modelli ciclici, è dovuta alla seconda legge della termodinamica. Come fa l'entropia a tornare a uno stato

tanto basso da permettere che la seconda legge della termodinamica abbia validità in ogni eone?

La singolarità del Big Bang è uno stato caratterizzato da un'entropia estremamente bassa. Man mano che l'universo si evolve, l'entropia aumenta. Come possiamo passare senza soluzione di continuità all'eone successivo e resettare l'entropia? È questo il motivo per cui Penrose non fu affatto contento quando Hawking ammise la propria sconfitta nella scommessa sui buchi neri. Secondo Penrose, i buchi neri costituiscono il meccanismo che permette di resettare l'entropia. Tutta l'entropia che entra in un buco nero va persa o viene sottratta al sistema nel suo complesso, cosicché alla fine dell'eone ci troviamo di nuovo in una situazione di bassa entropia, dato che ogni informazione è stata persa nella pletora di buchi neri che popolano l'universo. Ciò predispone le condizioni per l'avvento del Big Bang successivo.

Anche nel caso in cui la teoria sia corretta, come facciamo a scavare a ritroso fino al periodo che ha preceduto il nostro Big Bang per verificare la sua validità o la validità di altre teorie? Il «prima del Big Bang» è un'area a cui non possiamo avere accesso? No, secondo Penrose. Dato che i due confini dei paesaggi devono combaciare, le cose successe nell'eone precedente dovrebbero ripercuotersi sul nostro. Penrose ritiene che le collisioni tra buchi neri durante le fasi finali dell'ultimo eone abbiano prodotto onde gravitazionali che sarebbero passate nel nostro eone. Un fenomeno paragonabile a uno stagno in cui sono stati gettati molti sassi. Una volta che i buchi neri e i sassi sono scomparsi, resterà comunque una configurazione di onde risultato dell'interazione di quei cerchi in espansione.

Secondo Penrose, questa è una traccia che potremmo cercare nella radiazione cosmica di fondo, la radiazione residua lasciata dal Big Bang da cui è nato il nostro universo. Anche se le fluttuazioni presenti in questa radiazione di fondo appaiono casuali, forse alcune di esse sono dovute a delle collisioni tra buchi neri avvenute nelle ultime fasi dell'eone precedente.

Il guaio è che la radiazione cosmica di fondo è notoriamente difficile da studiare, in parte perché non ce n'è a sufficienza. Potreste pensare che sia un'affermazione folle, considerato che la radiazione di fondo forma la superficie che racchiude l'universo osservabile. Eppure se fate una mappa di questa sfera che circonda l'universo e dovete passare in rassegna sezioni che si estendono per dieci gradi d'arco, finirete presto per esaurire le parti che non avete già osservato. Sebbene molti siano scettici sulla possibilità di individuare tracce lasciate dagli eoni precedenti in quello in cui ci troviamo, il modello di Penrose evoca la prospettiva eccitante che alla domanda su ciò che accadeva prima del Big Bang forse non è impossibile trovare una risposta come ritenevamo un tempo!

Un galileo dei nostri giorni

Ho fatto un salto nell'ufficio di Penrose, che si trova un piano sotto il mio a Oxford, per raccogliere la sua opinione sulla possibilità che un giorno sapremo che cosa accadeva prima del Big Bang. A ottant'anni suonati, Penrose è uno straordinario esempio di come il desiderio di conoscere non venga mai meno. Considerato che ha scritto un libro il cui sottotitolo è, nell'edizione originale, *Una guida completa alle leggi dell'universo*, potreste supporre che egli pensi di sapere tutto. Invece continua a porsi nuove domande.

«Un tempo sostenevo che il Big Bang è una singolarità e che perciò il concetto di tempo non ha alcun significato prima del Big Bang. "Prima" è una domanda priva di senso. Non è una domanda da porsi. È stato Stephen Hawking ad affermarlo, e direi che ero d'accordo con lui. Ma oggi la mia opinione è che ci sia consentito porci questa domanda.»

Penrose pensa dunque che non ci sia un inizio di tutto?

«Io credo che ci sia una sequenza infinita di eoni.»

Gli ho chiesto se questo era un esempio di una cosa che non possiamo sapere. Dopo tutto l'infinito è, in genere, un'area interdetta ai fisici.

«Potremmo riuscire a migliorare la nostra tecnologia e vedere alcuni eoni precedenti al nostro. Ma risalire fino all'inizio dell'intera sequenza? Be', è un buon candidato per il ruolo di qualcosa che probabilmente non sapremo mai. La gente dice che l'infinito è inconoscibile, ma in ambito matematico lo usiamo di continuo. Ci sentiamo completamente a nostro agio con il concetto di infinito. Insomma, se non proprio completamente a nostro agio, quantomeno in larga misura.»

Quando gli chiedo se pensa che esistano domande a cui, per la loro stessa natura, è impossibile dare una risposta, Penrose mi espone un'opinione prudente, com'è tipico del suo carattere.

«Mi preoccupa un poco l'idea che possa esserci qualcosa che rimarrà sempre inaccessibile alla nostra conoscenza. Può darsi che ci siano domande per le quali probabilmente non ci aspettiamo una risposta, suppongo. Problemi che riteniamo insolubili, ma in seguito pensiamo di poter trovare un modo di aggirarli e arrivare a capirli almeno in parte. Non mi piace la parola inconoscibile. Significa solo che non stiamo osservando qualcosa nella maniera giusta.

«Un tempo non si pensava che sarebbe stato possibile sapere che cosa accade nel centro del Sole, ma oggi sappiamo che cosa si verifica nel Sole. Eppure non molto tempo fa la gente l'avrebbe considerata una domanda a cui era impossibile rispondere, suppongo.

«Possiamo moltiplicare tra loro due numeri incredibilmente grandi quando il risultato ha più cifre di quante sono le particelle nell'universo e perciò non può essere messo per iscritto? Questo va annoverato come problema insolubile? Non sembra altro che un seccante problema insolubile.

«Credo di avere un pregiudizio – non vorrei definirla una posizione che sto sposando – e questo pregiudizio mi fa propendere per l'idea che non esistano cose assolutamente inconoscibili.» Penrose appare un po' preoccupato. «Spero di non averla delusa dicendo che non ci sono cose inconoscibili.»

Gli suggerisco che possa essere un atteggiamento mentale importante per chi fa scienza.

«Un problema può essere decisamente difficile, ma in qualche modo hai la sensazione che debba esistere una soluzione. Io ce l'ho questa sensazione, ma non so se è giustificata. Non mi aspetto di vedere le risposte alle grandi domande nel periodo che mi resta da vivere, anche se sarebbe bello vederne risolvere alcune delle più immediate.»

Gli chiedo quale problema gli piacerebbe vedere risolto se ne potesse scegliere uno. Siccome il tempo è ciò che gli occupa la mente, mi dice che opterebbe per la prova dell'esistenza di un tempo prima del Big Bang.

«Mi piacerebbe vedere dei segnali provenienti dall'eone precedente. Ma siamo molto lontani dall'arrivarci.»

Dunque questo venir meno della necessità di un inizio costituisce una minaccia per chi crede in un Dio creatore di ogni cosa? Penrose ride ricordando di come si era preoccupato all'idea che la sua teoria potesse irritare il mondo ecclesiastico, come era successo al suo eroe Galileo.

«Partecipai a questo evento in Vaticano e mi sentivo un po' nervoso. Ma poi mi resi conto che stavano rendendo omaggio a Galileo e all'invenzione del cannocchiale astronomico. Così esposi la mia teoria dei cicli del tempo e pensavo che l'idea che il Big Bang non fosse l'inizio li avrebbe messi a disagio. "Assolutamente no, va benissimo" fu la loro risposta. "Se le cose stanno così, è Dio ad averle create così."»

Fuori dal tempo

La risposta del Vaticano rinvia a una domanda che ha sempre affascinato i pensatori religiosi: qual è il rapporto di Dio col tempo, soprattutto alla luce delle moderne rivelazioni sulla sua natura fluida? La teoria della relatività speciale di Einstein mette in dubbio l'idea secondo cui ha senso parlare di un evento che ne precede un altro. Da una prospettiva, l'evento *A* accade prima dell'evento *B*, ma come mostrò Einstein, da

un’altra prospettiva può essere l’evento *B* a verificarsi prima di *A*.

Per gli intellettuali credenti ciò costituisce un problema interessante: qual è la prospettiva di Dio? Per Dio, *A* si è verificato prima di *B* o viceversa? Una soluzione possibile è simile alla risposta che Penrose si è sentito dare in Vaticano: porre Dio fuori dal tempo. Come Dio non si trova in un punto particolare dello spazio, non è necessario collocarlo in un punto specifico del tempo.

Chi ne sta al di fuori osserva lo spaziotempo come una persona che, stando in cima a una montagna, potrebbe osservare dall’alto la configurazione del terreno. Ma questa visione sullo spaziotempo abbraccerebbe il passato, il presente e il futuro: il tempo intero in un colpo solo. Seppur non espressa nei termini della geometria quadridimensionale lorentziana, questa è esattamente la posizione assunta dal teologo del IV secolo sant’Agostino di Ippona.

Einstein tentò di usare questa prospettiva sul tempo per dare conforto alla sorella dell’amico Michele Besso, quando le scrisse: «Ora lui ha lasciato questo mondo un po’ prima di me. Questo non significa nulla. Le persone come noi, che credono nella fisica, sanno che la distinzione tra passato, presente e futuro altro non è che una persistente, cocciuta illusione». Dovremmo considerare la nostra esistenza in questo punto del tempo come l’essere a Londra invece che a Parigi.

Eppure per alcuni teologi un Dio al di fuori del tempo rappresenta un problema, perché questa concezione non gli concede lo spazio per agire nel mondo. Se si opta per il teismo invece che per un semplice deismo, allora Dio deve avere la capacità temporale di intervenire nel mondo. Se Dio si limita a osservare l’intero spaziotempo nella sua globalità, allora il futuro è già presente nel paesaggio. È interessante notare che, se è possibile non essere d’accordo sull’ordine degli eventi, non si può non essere d’accordo su tale ordine quando tra gli eventi sussiste un rapporto di causalità. Ciò richiede un Dio che possa entrare e uscire dal tempo, plasmando la geometria dello spaziotempo. Ma un Dio che agisce nel mondo è un Dio

che agisce nel tempo. Perciò è molto difficile conciliare un Dio senza tempo con uno che agisce nell'universo.

La questione rimane: che cos'è quell'entità chiamata Dio che dovrebbe esistere al di fuori del tempo? Può esistere qualcosa al di fuori del tempo? In effetti c'è una cosa che io tendo a considerare senza tempo: la matematica. Ed essendo un'entità senza tempo, la matematica si adatta perfettamente al compito di innescare la creazione di ciò che osserviamo intorno a noi. Essa è la forza creatrice a cui dobbiamo le equazioni della fisica quantistica che ci danno lo spaziotempo e la nascita di qualcosa dal nulla. La matematica possiede una qualità affascinante: non è necessario chiedersi chi l'abbia creata. Esiste semplicemente. Forse dovremmo rovesciare il vecchio adagio secondo cui «Dio è un matematico». Forse la matematica è il dio a cui tutti danno la caccia. Se sostituiamo la parola «Dio» con la parola «matematica» nella definizione che Tommaso d'Aquino tenta di formulare, penso che l'esito dell'operazione risulti più che soddisfacente: «La matematica deve essere pensata come esistente al di fuori del dominio delle cose esistenti, come una causa da cui discende tutto ciò che esiste in diverse forme».

Il concetto si avvicina all'idea espressa dal fisico teorico Max Tegmark con la sua ipotesi dell'universo matematico (o MUH). Tegmark suggerisce che il nostro universo fisico altro non è che una struttura matematica astratta. Il suo è uno sguardo moderno sulla filosofia pitagorica. Egli conclude l'articolo scientifico in cui formula la sua supposizione con le seguenti parole: «Se la MUH è vera, si tratta di una notizia fantastica per la scienza, poiché ciò apre la strada alla possibilità che un giorno un'unificazione elegante di fisica, matematica e scienza dell'informatica permetterà all'uomo di conoscere la realtà a un livello ancora più profondo di quanto molti sognavano sarebbe stato possibile».

Io probabilmente non mi avventurerei come Tegmark fino a identificare il nostro universo fisico con la matematica. Appare arduo distinguere matematicamente tra due universi in cui c'è uno scambio tra cariche positive e negative. Sarebbero diversi dal punto di vista fisico, ma la loro descrizione matematica sarebbe la medesima. È un esempio di ciò che prende il nome

di quidditismo, ovvero l'idea secondo cui l'universo consiste in qualcosa di più della mera relazione tra gli oggetti che ne fanno parte: ciò che gli oggetti sono, la loro essenza (*quid* in latino significa «ciò che è») offre un ulteriore livello di distinzione.

Se la matematica è eterna e fuori dal tempo, non c'è bisogno di un creatore che dia inizio alle cose. Le equazioni della matematica sono effettivamente fuori dall'universo e perciò potrebbero assumere il ruolo di qualcosa di soprannaturale e divino. Non si tratterebbe, tuttavia, di un Dio che agisce nel mondo, perché questa sarebbe una visione deistica. La domanda interessante che sorge è allora la seguente: quanti modi distinti ci sono di approntare un universo utilizzando un insieme di equazioni matematiche? In questa prospettiva i multiversi originano da modelli multimatematici.

C'è chi sostiene che avere un'equazione che va da zero unicorni a tre unicorni al secondo non significa che gli unicorni esistano. Di conseguenza, il fatto di avere equazioni che danno conto della fisica dei quark e delle loro interazioni con vari campi non rende in alcun modo i quark più reali degli unicorni. È quella che Hawking definisce la necessità di capire come «insufflare fuoco nelle equazioni». Per esempio, che cosa ha portato il nostro universo ad avere le cariche positive e negative collocate come sono anziché nel modo opposto? Qual è l'origine del *quid* nel «quidditismo»?

Se non ci fossero né universo né materia né spazio, se non ci fosse niente, io penso che la matematica esisterebbe comunque. Non le occorre il mondo fisico per esistere. Perciò, secondo me, è una candidata molto seria al ruolo di causa prima. Questo spiegherebbe anche la sua «irragionevole efficacia», per citare la frase con cui Eugene Wigner ha voluto esprimere la misteriosa capacità della matematica di spiegare i fenomeni fisici. Se sono una conseguenza della matematica, non dovrebbe sorprenderci il fatto di trovare continuamente spiegazioni matematiche al cuore dell'universo in cui viviamo.

Il tempo: un'espressione dell'incompletezza della conoscenza

C'è chi vorrebbe che rinunciassimo del tutto alla necessità di parlare del tempo. Il mio orologio non si è fermato. Mi dice che sono passate da poco le dieci di sera. Ma che cosa significa? Se mettessi un altro orologio che segna la stessa ora su un'astronave, al suo ritorno non concorderebbe più con il mio.

Le scoperte di Einstein mi rivelano che la miglior cosa che posso fare è mettere a confronto orologi diversi. Non esiste un orologio che misuri il tempo assoluto. Una cosa del genere non ha senso. Come fece Galileo a scoprire che le oscillazioni dei pendoli costituiscono un buon metodo per misurare il tempo? Assisteva alla messa e stava osservando il lampadario della chiesa oscillare per il vento. Quando mise a confronto la durata di quelle oscillazioni con il battito del proprio cuore, si rese conto che il tempo necessario a compiere un'oscillazione completa da un lato all'altro non dipendeva dall'angolo dell'oscillazione stessa. Ma in quel caso Galileo stava facendo un raffronto tra una misura del tempo e un'altra che presupponeva costante. La verità è che qualsiasi strumento per la misura del tempo è relativo a qualcos'altro.

Tornando alle equazioni della fisica, scopriamo che, sebbene il tempo sembri ricoprire un ruolo fondamentale al loro interno, è possibile riscriverle senza farvi alcun riferimento. Si direbbe che, poiché possediamo un senso così forte del suo trascorrere, il tempo abbia costituito per noi la finestra più ovvia attraverso cui osservare il mondo. I libri di meccanica non parlano d'altro che dell'evoluzione dell'universo rispetto al tempo. Nell'equazione della traiettoria di una palla, il tempo è l'input che permette di calcolare dove si troverà la palla. Ma nessuno di questi libri offre una definizione del concetto di tempo e nessun fisico ha spiegato in maniera soddisfacente che cosa intendiamo quando parliamo di tempo. Perciò, forse, la miglior strategia consiste nell'eliminarlo completamente.

Tale era l'obiettivo del fisico Julian Barbour. Privo di una posizione accademica, costretto a mantenere la famiglia traducendo dal russo, Barbour ha elaborato una teoria della fisica che elimina la necessità del tempo. Le sue idee sono esposte in un libro pionieristico intitolato *La fine del tempo* e pubblicato nel 1999. «Nulla accade: esiste l'essere ma non esiste alcun divenire. Il fluire del tempo e il moto sono illusioni.» Alcuni fisici che fanno parte del mondo accademico tradizionale hanno preso molto sul serio le idee di Barbour.

Ma allora perché ho la sensazione che ci sia qualcosa chiamato tempo che fluisce e di cui io sono alla mercé? Perché ho la sensazione di non poter mai tornare indietro nel tempo, e che il futuro se ne stia là fuori in attesa di accadere? Perché ricordo il passato ma non il futuro? Il fisico italiano Carlo Rovelli e il matematico francese Alain Connes pensano che queste sensazioni siano la conseguenza di un'incompletezza della conoscenza. Secondo la loro teoria, chiamata ipotesi del tempo termico, il tempo è un fenomeno emergente, non un concetto fondamentale.

Se considero un sistema fisico qualsiasi, come le molecole di gas contenute nella mia stanza, in genere non ho una conoscenza completa dello stato microscopico di quelle particelle, ma soltanto una descrizione globale macroscopica che potrebbe dar conto di molti stati microscopici distinti. Sono costretto a considerare la situazione dal punto di vista statistico a causa della mia mancanza di una conoscenza completa del sistema. Rovelli e Connes sono in grado di dimostrare per via matematica come questa conoscenza incompleta possa dare origine a un flusso che possiede tutte le proprietà che associamo alla nostra percezione del tempo. I due scienziati ritengono che il tempo emerga solo da questa analisi macroscopica di un sistema microscopico sconosciuto. Se scavassimo a sufficienza, il tempo scomparirebbe, un po' come perde di significato il concetto di superficie di un liquido quando scendiamo al livello atomico. Un altro modo per afferrare quest'idea è pensare al fatto che non è possibile parlare della temperatura di un singolo atomo o di una molecola d'acqua bagnata. Il tempo non è un'entità fondamentale ma una proprietà emergente di quel tipo.

Ciò non significa che queste cose non siano reali, che non siano reali il calore, l'umidità, il tempo che scorre. Guardo il mio orologio. Le cifre 23.55 mi fissano. Un'altra giornata che si avvicina al termine. Sta per scoccare la mezzanotte, annunciando la fine della festa e comunicandomi la sensazione di essermi avvicinato di un altro giorno al momento in cui non sarò più in grado di conoscere. Ma perché provo sensazioni? Perché percepisco il passaggio del tempo, il dolore di un alluce che ho sbattuto, il gusto piacevole di un buon vino, l'eccitazione che mi dà ascoltare Prokof'ev? Tutto ciò è al centro di una delle più grandi questioni irrisolte e forse irrisolvibili che si trovano nei libri di scienza, come scopriremo nel prossimo Confine.

Sesto Confine: il chatterbot

11

«Il mio cervello è il mio secondo organo preferito.»

WOODY ALLEN, *Il dormiglione*

Ho scaricato un'app per smartphone, un chatterbot che si chiama Cleverbot, e lo sto provando ora. Vuole convincermi che è umano, e ho quindi deciso di porgli alcune domande per metterlo alla prova. Per fare un confronto, ho sottoposto allo stesso test anche un amico di mio figlio. Ecco le risposte che mi hanno dato: sapreste stabilire chi è l'umano e chi il chatterbot?

Domanda 1: Hai una ragazza?

Risposta A: Vuoi che abbia una ragazza?

Risposta B: Fatti gli affari tuoi.

Domanda 2: Qual è il tuo sogno nel cassetto?

Risposta A: Sogno di diventare un famoso poeta.

Risposta B: Fare un sacco di soldi.

Domanda 3: Sei cosciente?

Risposta A: Se non lo fossi, non penso che…

Risposta B: È l'unica cosa di cui sono sicuro.

Quanto più gioco con Cleverbot, tanto più addestro il programma a rispondere come un essere umano: ogni conversazione viene infatti conservata in vista di quelle future, così che le mie reazioni entreranno a far parte di quello che Cleverbot potrebbe dire in un'altra occasione.

Anche se finora le risposte alle mie domande non permettono di raggiungere una conclusione, basta poco prima che una conversazione con Cleverbot riveli che l'app non è un essere umano. Tuttavia, la questione se il mio smartphone diventerà mai abbastanza intelligente da essere consapevole della propria esistenza, o se io sono davvero in grado di stabilire se l'amico di mio figlio sia veramente cosciente o se non sia anche lui nient'altro che una buona simulazione, è molto più spinosa e sta al centro di uno degli inconoscibili più difficili che abbiamo di fronte.

Entrambe le risposte alla mia domanda sulla coscienza si richiamano alla famosa formula di Cartesio «*Cogito, ergo sum*. Penso, dunque sono», la sua risposta agli scettici che si chiedevano se potessimo essere davvero sicuri di conoscere qualcosa riguardo all'universo. Nato nell'Accademia di Platone ad Atene, lo scetticismo metteva in discussione la nostra possibilità di avere conoscenze certe riguardo all'universo. Voi ora state pensando di tenere in mano un libro o magari un dispositivo elettronico, ma ne siete proprio sicuri? Io ho preso il dado sul mio tavolo, o almeno credo di averlo fatto; magari, però, è tutto un sogno, e in realtà non esistono né il libro né il dado. Forse tutta la nostra esperienza è un ambiente simulato al computer immesso nei nostri cervelli come in qualche scena del film *Matrix*. Nelle sue *Meditazioni*, Cartesio ribatte che, in tutti i vari scenari, l'unica cosa di cui posso essere sicuro è la mia stessa esistenza, la mia coscienza; tuttavia, proprio questo «io» potrebbe rivelarsi uno degli inconoscibili ultimi.

Stai pensando quello che penso io?

C'è una cosa che gli scienziati chiamano l'arduo problema della coscienza. È una questione relativa al nostro mondo interno: che cos'è ciò che mi rende me stesso? Da cosa è creata, di preciso, la nostra sensazione di consapevolezza? Quali sono gli ingredienti e i meccanismi che creano la coscienza, e come emerge? Come posso sapere che la mia esperienza cosciente ha la medesima qualità della vostra? Potrò mai entrare nelle vostre teste e fare esperienza di ciò che state provando? Quando bevo troppo, l'indomani mattina mi sveglio con il mal di testa; ma questa mia sensazione è simile ai postumi della sbornia che provate voi? Quando guardo il mio dado da casinò, vedo un oggetto rosso. Voi chiamate questo colore con il medesimo nome, e tutti sperimentiamo la stessa lunghezza d'onda della luce; ma lo vedete davvero come lo vedo io? E ha senso porsi questa domanda? Quando suono il violoncello, le vibrazioni delle corde che raggiungono le vostre orecchie sono le stesse che arrivano alle mie, ma come potrò mai sapere se i vostri cervelli provano il mio stesso brivido nell'ascoltare una suite di Bach?

Oggi viviamo in un'età dell'oro per quanto riguarda la questione della coscienza. Nel Quarto Confine, ho descritto come l'invenzione del telescopio permise a Galileo e ai suoi contemporanei di sondare i confini dell'universo. Nel Secondo Confine, abbiamo visto come l'invenzione del microscopio ci offra uno strumento con cui scavare

in profondità nella struttura della materia. Oggi, agli inizi del XXI secolo, abbiamo la fortuna di disporre di nuovi telescopi, telescopi della mente: l'fMRI (risonanza magnetica funzionale) e l'EEG (elettroencefalografia) consentono agli scienziati di scrutare nei nostri cervelli e di misurare l'attività associata ai nostri diversi modi di percepire il rosso, il dolore e il suono del violoncello.

Tuttavia, vedere pur riscontrando la stessa, identica attività dentro la vostra testa, non ne posso concludere che la mia esperienza cosciente coincida con le vostre. Come mai? Essendo fatti in un modo molto simile, cosa non va nell'ipotesi che il vostro mondo interno sia simile al mio? Facciamo appello allo stesso principio di omogeneità che ha un ruolo chiave in cosmologia: è molto probabile che qui succedano le stesse cose che succedono là. Eppure, io ho soltanto la mia esperienza cosciente su cui basarmi, un punto di riferimento. E se la mia coscienza fosse qualcosa di unico e differisse da tutte le altre, anche se nei test il mio cervello pare comportarsi nello stesso, identico modo dei vostri? Come potrei scoprire se il mio modo di esperire le cose è diverso? Forse, del resto, voi non siete neppure coscienti: come faccio a saperlo? Il linguaggio si è evoluto in un modo tale per cui mi ritrovo a dire «rosso» per descrivere tutto ciò che la mia società considera rosso; può darsi però che la mia esperienza cosciente del rosso sia assai differente dalle vostre.

Sappiamo già che esistono persone le cui esperienze coscienti sono di qualità diverse quando ascoltano un violoncello o vedono il numero 2. Nei sinesteti, queste esperienze attivano anche altri sensi. Quando vede il numero 9 o la lettera S, mia moglie avverte la sensazione di un rosso molto scuro. Il mio compositore preferito, Olivier Messiaen, percepiva diversi colori sentendo determinati accordi. Il fisico Richard Feynman aveva la stessa esperienza con i colori, indotta nel suo caso dalle equazioni matematiche. Queste sono cose che i nostri nuovi telescopi della mente potrebbero spiegare o almeno rilevare; potrebbero individuare nei cervelli comportamenti effettivamente diversi. Ma anche se tutte le evidenze indicano che la persona di fronte a voi ha un cervello che mostra la medesima attività del vostro, sarete mai in grado di dire se è davvero cosciente o se, piuttosto, non si tratta soltanto di uno zombie che sta imitando molto bene una persona cosciente? Questo è l'arduo problema della coscienza, una di quelle domande di cui, per alcuni, non possiamo conoscere la risposta.

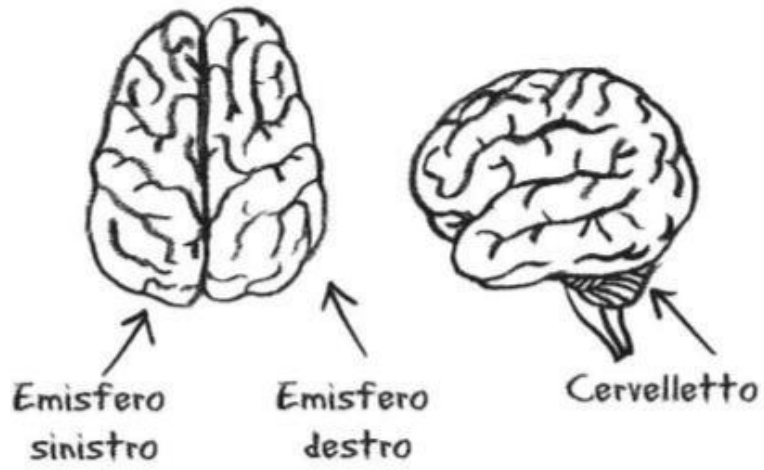
Dov'è la coscienza?

Molte delle altre questioni che ho esplorato hanno alle spalle una ricca storia che mostra quante cose siamo riusciti a scoprire, nel corso dei secoli, grazie alle nostre indagini. Il problema della coscienza e di come entrare in un cervello vivente, però, è talmente difficile che fino all'avvento delle nuove tecnologie, negli ultimi decenni, è rimasto appannaggio dei teologi e dei filosofi più che degli scienziati. Ciò non vuol dire, comunque, che gli uomini non abbiamo almeno tentato di risolvere il problema.

La domanda su dove sia situato il mio «io» ha tormentato gli scienziati per secoli. Io ho la forte sensazione che si trovi da qualche parte subito dietro i miei occhi: mi sembra quasi che ci sia una minuscola versione di me stesso seduta lì a osservare il mondo attraverso i miei occhi come attraverso lo schermo di un cinema, intento a prendere decisioni su come il corpo che racchiude la mia coscienza dovrà agire. C'è senza dubbio la sensazione che la mia coscienza non dipenda, per la sua esistenza, dall'intero mio corpo. Se mi tagliassero una mano, non avrei l'impressione che la mia coscienza sia stata divisa in due. La mia mano non sono io. Ma quanti pezzi potrebbero tagliarmi prima che io scopra ciò che mi rende me stesso?

Non tutti hanno condiviso la convinzione che il cervello sia la sede della nostra coscienza. Aristotele, per esempio, pensava che il cervello avesse soltanto la funzione di raffreddare il cuore, da lui considerato l'autentica sede dei sensi. Altri compresero che il cervello era probabilmente la chiave della nostra identità. L'anatomista Rufo di Efeso, vissuto nel I secolo d.C., ci ha lasciato una delle prime descrizioni fisiche di questo organo. Quando il cervello viene rimosso dal cranio, si notano subito tre parti distinte: due metà, che sembrano l'una l'immagine speculare dell'altra e formano il telencefalo, e, sotto di esse, il cervelletto, che pare una versione in miniatura del cervello.

Sezionando il cervello, troverete cavità piene di liquido: i ventricoli. Nel Medioevo, gli scienziati pensavano che queste strutture controllassero le diverse attività mentali: l'immaginazione nel ventricolo frontale, la memoria in quello posteriore e la ragione in mezzo. Leonardo da Vinci credeva che il senso comune – quella cosa che combina i cinque sensi in una esperienza comune vicina alla nostra idea di coscienza – fosse situato nel ventricolo frontale.



A sinistra, una rappresentazione del cervello visto dall'alto mette in evidenza i due emisferi. A destra, una rappresentazione del cervello visto da sinistra mostra il cervelletto situato alla sua base.

Per contro, Cartesio riteneva che, dato che ciascuno di noi ha una singola coscienza, dovremmo piuttosto cercare nel cervello una singola entità, qualcosa che non abbia un'immagine speculare; come sede dell'anima, quindi, propose la ghiandola pineale.

Anche con un microscopio, è difficile vedere che cosa ci sia in questo ammasso di materia grigia che potrebbe dare origine a quel complesso individuo che ora sta leggendo questo libro. Non avevo mai visto un cervello dal vivo e mi chiedevo se incontrarne uno faccia a faccia, o cervello a cervello, potesse farmi venire qualche nuova intuizione. Ho così visitato un luogo dove c'è una delle più alte concentrazioni di cervelli nel paese: non l'Università di Oxford, ma la Parkinson's UK Brain Bank, dove mi è stato consentito di vedere il mio primo cervello, appartenuto a un uomo morto di recente che aveva donato il suo organo a questa banca dei tessuti.

Il contenitore in cui il cervello è conservato porta l'etichetta «C33». Il suo contenuto, però, una volta aveva un nome come il vostro o il mio; era la sede delle speranze e delle paure, dei ricordi e dei sogni, degli amori e dei segreti dell'ottantanovenne che ha scelto di donare il proprio cervello alla scienza medica. Ma lui dov'è, adesso? All'interno di questo cervello c'era qualcosa che dava origine alla sua esperienza cosciente prima che morisse, qualcosa che ora si è fermato. Ma di che cosa si tratta?

Il semplice fatto di tenere in mano il contenitore con questo cervello non mi aiutava a capire come potesse dare origine alla nostra esperienza cosciente. Aveva l'aspetto di un grosso ammasso di foie gras. La convinzione che i ventricoli – i canali pieni di liquido – fossero la chiave del nostro mondo cosciente era una falsa

pista; l'idea che le diverse regioni del cervello fossero responsabili di differenti funzioni, però, si è dimostrata corretta.

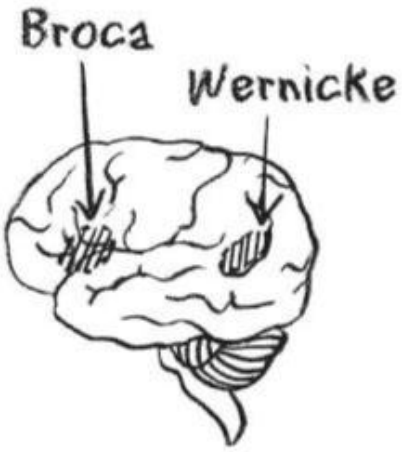
Fu analizzando i cervelli che non funzionavano in modo adeguato a causa di danni o lesioni subite che gli scienziati nell'Ottocento iniziarono a comprendere che a diverse aree del cervello fanno capo differenti funzioni. Per esempio, la parte frontale entra in gioco nella risoluzione dei problemi, nel prendere le decisioni e nel comportamento sociale e sessuale. La porzione centrale si occupa della sensazione, della percezione e dell'integrazione dei dati raccolti dai sensi. La zona posteriore è come lo schermo del cinema responsabile della percezione visiva, il che in parte spiega la sensazione che la mia coscienza stia lì a guardare il film della mia vita.

E per quanto riguarda i due emisferi cerebrali? Ci sono state molte ipotesi sul ruolo di ciascuno di essi, ma recenti ricerche hanno mostrato che il cervello è forse più plastico e più flessibile di quanto qualcuno avesse pensato. Detto questo, sappiamo che il centro del linguaggio è situato soprattutto nel lato sinistro. Nel XIX secolo, il medico francese Paul Broca analizzò i cervelli di pazienti che avevano perduto la capacità di parlare e scoprì che tutti avevano subito lesioni nella stessa parte del cervello, oggi chiamata area di Broca. Qualche anno dopo, nel 1874, il medico tedesco Carl Wernicke ipotizzò che i danni a un'altra area del cervello stavano dando ai suoi pazienti problemi nell'elaborazione logica del linguaggio piuttosto che nell'articolazione delle parole; situata verso la zona posteriore dell'emisfero sinistro, questa regione è oggi nota come l'area di Wernicke.

Il lato sinistro del cervello risponde anche del lavoro con i numeri che faccio quando calcolo le probabilità associate al lancio del mio dado da casinò: è qui, infatti, che i numeri vengono elaborati. Il lato destro del cervello è invece responsabile dell'elaborazione del suono del mio violoncello e dell'ascolto della musica, oltre che della rappresentazione di figure geometriche come la forma a icosaedro del mio universo ritagliato. Per operare al massimo dell'efficienza, i due lati sono in costante comunicazione attraverso il corpo calloso che li divide. Gli emisferi comunicano per mezzo delle fibre nervose che attraversano questa giunzione; si tratta di un design curioso, che provoca la formazione di un collo di bottiglia nella comunicazione fra i due lati del cervello.

Se il taglio di una mano non altera la mia coscienza, che cosa succede tagliando un cervello in due? Dato che la coscienza è un

risultato dell'attività cerebrale, se taglio il corpo calloso in modo che i due emisferi non possano più comunicare che ne è della mia coscienza? Si divide a sua volta in due?



Tagliare la coscienza in due

La procedura chirurgica detta callosotomia, che consiste nel tagliare il corpo calloso, venne eseguita per la prima volta negli anni Quaranta del secolo scorso su pazienti vivi per limitare le crisi epilettiche. Una crisi epilettica, in sostanza, è causata dalla scarica simultanea di un enorme numero di neuroni nel cervello, che viene così spazzato da un'ondata di attività elettrica. Si pensava che, tagliando il corpo calloso, almeno un lato del cervello sarebbe stato risparmiato da questa scarica elettrica. Ma qual era l'effetto di questo intervento sulla coscienza?

Solide evidenze suggeriscono che, di fatto, il corpo ospita ora due coscienze distinte. Dato che ciascun emisfero del cervello è responsabile del comportamento fisico del lato opposto del corpo, questa divisione nella coscienza può essere osservata nel comportamento contrastante dei due lati del corpo. Ci sono straordinari filmati di un paziente sottoposto a callosotomia in cui la parte sinistra del corpo attacca fisicamente quella destra. Il lato sinistro del corpo, controllato dall'emisfero destro del cervello, non aveva accesso al centro del linguaggio, situato nell'emisfero sinistro, ed era quindi incapace di articolarsi verbalmente: a quanto pare, questa frustrazione si manifestava nell'attacco. Alla fine, il paziente dovette assumere dei farmaci per inibire l'emisfero destro e permettere al sinistro di dominare.

È difficile determinare se questo caso mostri veramente una coscienza ospitata nell'emisfero destro che si ritrova ai ferri corti con quella dell'emisfero sinistro: di fatto, potrebbe anche trattarsi di semplici risposte fisiche disconnesse da ogni esperienza cosciente, come quando un colpo dato sul ginocchio col martelletto provoca una risposta fisica involontaria.

Un altro esperimento degno di nota che corrobora l'idea di due identità all'interno di un singolo corpo riguarda il contare. Un paziente sottoposto a callosotomia venne messo dietro uno schermo oltre il quale c'era un tavolo con sopra diversi oggetti. Poteva far passare la mano destra o quella sinistra attraverso un buco nello schermo e usarla quindi per contare quanti oggetti c'erano sul tavolo nascosto alla sua vista.

Quando usava la mano destra, il paziente era in grado di dire correttamente ad alta voce il numero di oggetti che la sua mano aveva incontrato. Quando usava la sinistra, invece, accadeva qualcosa di molto curioso: alla richiesta di dire quanti oggetti aveva incontrato, la sua risposta era del tutto casuale e sbagliata. L'emisfero linguistico del cervello (quello sinistro), che avrebbe dovuto dire il numero, non aveva accesso alla mano sinistra (controllata dall'emisfero destro) e, quindi, tirava a indovinare.

Tuttavia, quando lo sperimentatore chiese al paziente di sollevare un numero di dita corrispondente agli oggetti incontrati, il paziente non ebbe problemi a indicare il numero corretto. Un lato del cervello era in grado di articolare la risposta, ma doveva tirare a indovinare; l'altra metà poteva usare solo il linguaggio dei segni, ma aveva accesso al dato corretto. Sembra che questa situazione sia più difficile da spiegare in termini di semplice risposta fisica automatica agli stimoli esterni.

Di nuovo, il lato destro potrebbe mantenere la capacità di funzionare in modo intelligente; ma forse qui abbiamo il caso di uno zombie che, per quanto privo di ogni mondo cosciente interno, è ancora in grado di funzionare come un essere cosciente. Come possiamo sapere se le cose stanno in un modo o nell'altro? E, in ogni caso, perché dovremmo limitare la coscienza all'emisfero sinistro, responsabile del linguaggio?

I cervelli divisi sembrano incapaci di unificare le informazioni come fanno i cervelli connessi. Mostrate all'occhio sinistro la parola «porta» e a quello destro la parola «chiavi», e la persona dirà ad alta voce la parola «chiavi» e potrà indicare con la mano sinistra la raffigurazione di una porta, ma non sarà in grado di unificare le due

cose nel concetto di un «portachiavi». Ma questo è davvero un esempio di due coscienze distinte o, piuttosto, è semplicemente la prova di come un cervello diviso non sia capace di formulare una connessione cognitiva?

Molti pazienti sottoposti a callosotomia sono in grado di agire: possono guidare, lavorare e muoversi normalmente in un contesto sociale. Quindi, i due lati possono di fatto integrarsi, o questo è un esempio di come le due coscienze riescano ad agire in tandem, come due copie identiche dove una replica il comportamento dell'altra?

La coscienza integra i molteplici input che il nostro cervello riceve dai sensi in una singola esperienza. Nel caso dei pazienti sottoposti a callosotomia, il cervello è incapace di svolgere questo compito. Forse, però, alcuni cervelli, anche senza callosotomia, hanno difficoltà a integrare l'attività cerebrale in una esperienza unificata. Può darsi che i disordini come la schizofrenia o il disturbo di personalità multipla siano causati da un cervello che non riesce a integrare tutto in una singola voce, e il risultato è un soggetto che sembra avere più di una coscienza.

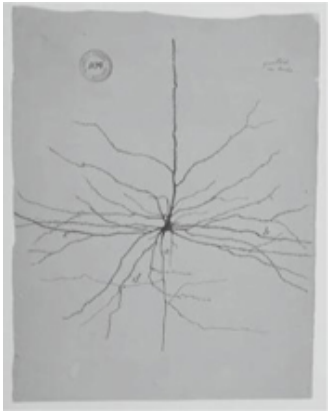
Anche se i cervelli danneggiati aiutarono i neuroscienziati a comprendere l'associazione fra determinate regioni cerebrali e certe funzioni, il vero passo avanti nella comprensione dell'architettura del cervello si ebbe alla fine dell'Ottocento, con il lavoro dello scienziato spagnolo Santiago Ramón y Cajal.

Accendere e spegnere il mio io

Nato nel 1852, da ragazzo Ramón y Cajal avrebbe voluto fare l'artista, ma suo padre non la considerava una professione appropriata: una carriera medica sarebbe stata una scelta molto più meritevole. Per accendere nel figlio l'interesse per la medicina, escogitò quindi una strategia interessante: portarlo nei cimiteri alla ricerca di resti umani. Con quello che trovavano, Ramón y Cajal indulgeva nella sua disposizione artistica disegnando diagrammi delle ossa dissotterrate; alla fine, comunque, il padre riuscì nel suo intento e lui si appassionò sempre di più a quella anatomia umana che stava ritraendo. Prese la laurea in Medicina nel 1877.

Dieci anni più tardi, Ramón y Cajal scoprì un modo per combinare l'anatomia con il suo amore per l'arte. Mentre era professore all'Università di Barcellona, sentì parlare di una nuova tecnica grazie alla quale, usando il nitrato d'argento, era possibile

mostrare la struttura delle cellule nervose. Applicando questa tecnica alle cellule del cervello, Ramón y Cajal ci consentì di vedere per la prima volta la straordinaria e complessa natura di questo pezzo della nostra anatomia. Con il nitrato d'argento, poteva colorare a caso delle singole cellule cerebrali per mettere in luce la loro struttura, con risultati sorprendenti e affascinanti.



Questa è una delle prime immagini di un neurone; nella fattispecie, si tratta di una cellula retinica umana. Le immagini come questa furono uno dei primi elementi a indicare che il cervello non era una struttura continua ma era costituito da cellule discrete interconnesse, chiamate neuroni.

Continuando a colorare sempre più cellule in diverse aree del cervello, Ramón y Cajal scoprì neuroni di svariate forme e dimensioni. Sfruttando la propria abilità artistica, riempì i suoi album di schizzi con la complessa schiera delle strutture via via identificate, documentandole come un collezionista di farfalle. Oggi sappiamo che nel cervello umano ci sono circa 86 miliardi di neuroni: per contarli al ritmo di uno al secondo, occorrerebbero più di 2700 anni. Pur presentandosi in molte forme e dimensioni differenti, come mostrano gli schizzi di Ramón y Cajal, i neuroni del corpo hanno una struttura di base molto simile, data da una cellula centrale chiamata soma da cui si dipartono dei prolungamenti detti assoni e dendriti.

Come funzionano queste cellule? Un neurone si attiva, o si accende, un po' come un interruttore. Per esempio, se il mio orecchio rileva una variazione della pressione dell'aria mentre sto suonando il violoncello, si avvia un cambiamento molecolare nel neurone, provocando il passaggio di una corrente elettrica attraverso la cellula. Questo neurone può quindi dialogare con un altro neurone attraverso connessioni chiamate sinapsi. Da ogni neurone esce un singolo assone (paragonabile a un cavo elettrico lungo il quale le informazioni viaggiano verso altri neuroni) che si connette ai

dendriti di altri neuroni attraverso le sinapsi; l'attività elettrica in un neurone può quindi provocare una reazione chimica attraverso una delle sinapsi connesse a un altro neurone, causandone l'accensione. Il funzionamento del cervello è molto simile a quello di un computer (o del mio smartphone con il suo chatterbot): i neuroni sono accesi oppure no.

È comunque vero che ci sono cose che distinguono il cervello da un computer. Nel determinare l'accensione di un neurone, entrano infatti in gioco fattori analogici. Il flusso chimico attraverso le sinapsi deve oltrepassare un tasso critico per innescare l'accensione del neurone associato; in altri termini, per la trasmissione delle informazioni non conta solo che i neuroni siano accesi, ma è altrettanto importante il tasso della loro attività. Detto questo, tali cellule neuronali discrete connesse da cavi che provocano la loro attivazione sono molto suggestive quando riflettiamo sulla possibilità di creare una coscienza artificiale in qualcosa come il mio smartphone. La rete dei neuroni, però, è una struttura estremamente complicata che l'evoluzione ha costruito per noi. Ciascun assone può essere connesso a 1000 diversi dendriti; potrebbero sembrare tanti, ma dato che il cervello ha 86 miliardi di neuroni, ognuno di essi comunica di fatto solo con una piccola frazione dell'intero.

È questa attività elettrica e chimica dei neuroni a dare origine all'attività cerebrale, e la sua perdita può far sorgere problemi e patologie. L'ottantanovenne di cui ho visto il cervello alla Parkinson's UK Brain Bank soffriva del morbo di Alzheimer, un risultato diretto della perdita di questi neuroni e di queste sinapsi.

Noi possiamo sezionare i cervelli, colorare le loro cellule con il nitrato d'argento e costruire una mappa statica della loro rete, ma come possiamo avere un'immagine dell'attività dinamica di un cervello vivo? Ciò che ha rivoluzionato lo studio del cervello è la possibilità di guardare al suo interno mentre è intento a svolgere determinati compiti. Lo studio del cervello ha potuto fare grandi progressi grazie allo sviluppo della tecnologia.

Telescopi neurali

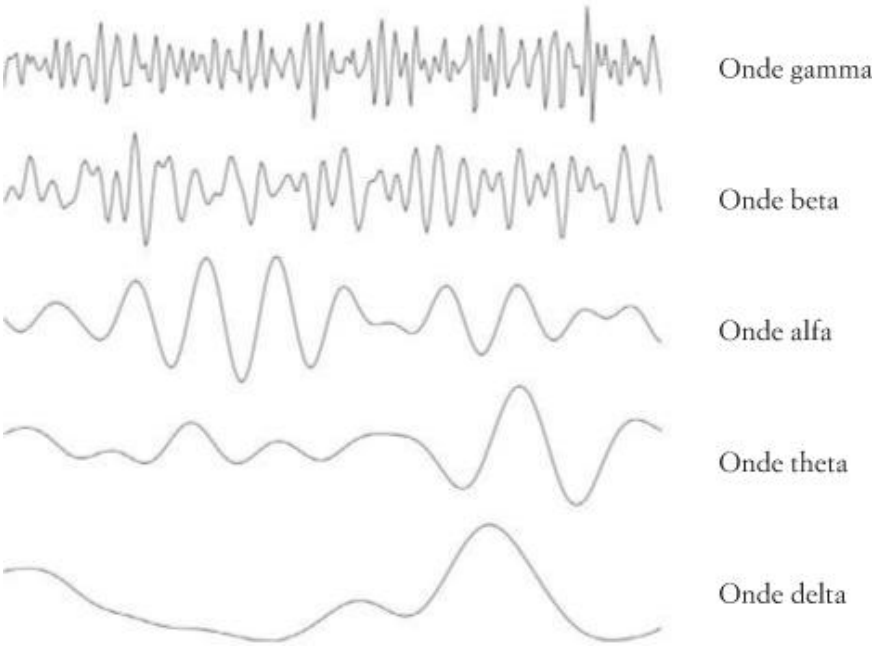
Il modo più facile e più veloce per farsi un'idea dell'attività cerebrale consiste nell'usare l'EEG. La prima volta che mi sono fatto scansionare il cervello con l'EEG ero un po' teso. Mi pareva una sorta di congegno alieno per l'estrazione dei cervelli. Con una procedura

piuttosto lunga – sembrava che dovessero scartavetrarmi il cuoio capelluto per avere un buon collegamento – hanno attaccato alla superficie della mia testa 64 elettrodi che, pur non servendo per estrarmi il cervello, consentivano l'accesso a parte dei miei processi di pensiero.

Sviluppata negli anni Venti del secolo scorso dal fisiologo tedesco Hans Berger, l'elettroencefalografia si serve degli elettrodi per registrare l'attività elettrica lungo il cuoio capelluto. L'EEG misura le fluttuazioni di voltaggio risultanti dal flusso di corrente elettrica all'interno e fra i neuroni del cervello. Con questo strumento, gli scienziati hanno rilevato diversi tipi di onde corrispondenti a differenti attività cerebrali. L'attività sincronizzata di un gran numero di neuroni dà origine a macroscopiche oscillazioni di diverse frequenze, che corrispondono a differenti stati del cervello.

La prima banda di frequenze scoperta, e la meglio conosciuta, è quella delle cosiddette onde alfa, che consistono in un'attività sincronizzata di un gran numero di neuroni capace di generare oscillazioni di 8-12 hertz. Si tratta di una frequenza molto più bassa di quella delle note prodotte dal mio violoncello, la più bassa delle quali vibra a 65 hertz; ciononostante, è un po' come una nota musicale che risuona attraverso il cervello. Le onde alfa possono essere rilevate nella parte posteriore del cervello durante uno stato di veglia rilassata, e crescono quando chiudiamo gli occhi. Non sono comunque le uniche note prodotte dal nostro cervello: esistono infatti onde di altre frequenze che possono essere registrate in differenti periodi dell'attività cerebrale.

- Le più lente sono le onde delta, di 1-4 hertz, associate al sonno profondo, senza sogni e senza coscienza.
- Salendo di frequenza troviamo subito dopo le onde theta, di 4-8 hertz, associate al sonno leggero o alla meditazione.
- Più veloci delle onde alfa sono le onde beta, di 13-30 hertz, che il cervello raggiunge quando è ben sveglio.
- Ritenute le più importanti per la capacità del cervello di creare la coscienza sono le veloci onde gamma, di 30-70 hertz, frequenze che arrivano a toccare il limite inferiore di quelle prodotte dal mio violoncello. Le onde gamma sono associate alla formazione delle idee, al linguaggio, all'elaborazione dei ricordi e a diversi tipi di apprendimento.



Il ronzio del cervello: dalle onde gamma alle onde delta.

Giorno e notte, mentre conduciamo la nostra vita, il cervello sembra comportarsi come un'orchestra che esegue una sinfonia, alternando movimenti veloci e movimenti lenti, con qualche occasionale scherzo quando sviluppiamo nuove idee o incontriamo nuove situazioni.

I tracciati dell'EEG cambiano drasticamente durante il sonno e mostrano una transizione dalle frequenze più veloci a quelle via via più lente, come le onde alfa. In realtà, le diverse fasi del sonno sono caratterizzate dalla differenza nella frequenza delle onde che attraversano il cervello, cosa che spiega il motivo per cui queste oscillazioni neurali possono essere collegate a stati cognitivi come la consapevolezza e la coscienza. Per esempio, quando l'EEG non rileva nessuna forma d'onda i medici dichiarano che il paziente è clinicamente morto. Sembra che le onde cerebrali siano il modo in cui il cervello sincronizza la propria attività per lavorare con la massima efficacia.

Anche se l'EEG consente agli scienziati un rapido accesso all'attività cerebrale, la risonanza magnetica funzionale (fMRI), sviluppata negli anni Novanta, è probabilmente il più conosciuto fra questi nuovi strumenti per vedere che cosa succede all'interno del cervello. In confronto alla compattezza dell'EEG, lo scanner dell'fMRI ha dimensioni enormi. Sembra una sorta di capsula per dormire dell'era spaziale, anche se quando è in funzione è impossibile addormentarsi: il suono dei magneti all'opera è talmente forte che, una volta entrato, ho dovuto mettermi i tappi nelle orecchie. Anche

se non si tratta di un'esperienza dolorosa, per farmi scansionare il cervello dall'fMRI e ottenere una chiara immagine di ciò che succede all'interno della mia testa ho dovuto rimanere fermo dentro il dispositivo per un tempo innaturalmente lungo.

Lo scanner rileva i cambiamenti nel flusso e nell'ossigenazione del sangue che avvengono in risposta all'attività neurale. Quando un'area del cervello è più attiva, consuma più ossigeno. L'aumento del flusso sanguigno verso l'area attiva può essere rilevato perché il sangue ossigenato è più magnetico. Lo scanner fMRI è in grado di cogliere questa fluttuazione magnetica, che può quindi essere usata per produrre mappe di attivazione che mostrano quali parti del cervello sono coinvolte in un determinato processo mentale.

Dato che l'EEG misura l'effettiva attività cerebrale attraverso la variazione nel comportamento elettrico mentre l'fMRI rileva una conseguenza secondaria di tale attività, l'EEG ci offre una misura molto migliore di ciò che avviene nel cervello. La capacità dell'EEG di registrare il cambiamento dell'attività cerebrale nel corso del tempo non può oggi essere eguagliata dall'fMRI. Il punto di forza degli scanner fMRI, d'altro canto, è che ci danno un'immagine del cervello a una definizione molto più alta. La combinazione dei due strumenti offre quindi un buon quadro del cervello in azione; per esempio, sia l'EEG sia l'fMRI sono stati in grado di identificare una regione molto specifica attiva mentre penso alla matematica. Posso quindi usare questi telescopi neurali per vedere la coscienza? Per il momento, questa visione ci sfugge. Resta da chiedersi se ci sia davvero qualcosa da vedere.

Il mio gatto è cosciente?

Anche se sappiamo quale parte del cervello è accesa durante determinate attività, e comprendiamo il funzionamento della fisica e della chimica del cervello, ciò non basta ancora a farci capire bene perché abbiamo un senso dell'io. Come possiamo anche solo accostarci a questo tipo di problema? Quando un matematico vuole cercare di capire che cos'è una determinata cosa, un'ottima strategia consiste nel tentare di comprendere perché un qualche altro oggetto non è identificabile con quella cosa.

Per esempio, malgrado tutti i tentativi del chatterbot di convincermi del contrario, non credo affatto che il mio smartphone sia cosciente, e neanche che lo sia la sedia su cui sono seduto. Ma

per quanto riguarda gli animali? Prima di scappare da casa, il mio gatto bianco e nero Freddie se ne stava nel mio ufficio vivendo una vita di comodità mentre io scribacchiavo le mie equazioni matematiche. Ma aveva un senso dell'io? E che dire dei bambini? Mentre i miei figli crescevano, i loro cervelli si evolvevano determinando un cambiamento nella loro coscienza e nella loro consapevolezza di sé. Possiamo quindi identificare diversi livelli di coscienza? Nello sviluppo del cervello ci sono delle soglie in corrispondenza delle quali emergono differenti stati di coscienza?

Com'è ovvio, interrogare un animale come il mio gatto sul suo mondo interiore è un problema. Verso la fine degli anni Sessanta del Novecento, lo studioso del comportamento animale Gordon Gallup si stava radendo allo specchio, riflettendo sulla questione di come sarebbe stato possibile testare la consapevolezza di sé negli animali, quando gli venne all'improvviso un'idea. Era consapevole che la faccia riflessa nello specchio era la sua e si chiese quindi quali animali sapessero che ciò che vedevano nello specchio non era un altro animale bensì un'immagine di loro stessi.

Dando una scorsa all'infinito numero di video di gatti su Internet, scopriamo che questi animali tendono a pensare che l'immagine nello specchio sia un loro rivale presente nella stanza. In che modo possiamo stabilire se un animale si rende conto che quella che ha davanti è una sua immagine? Gallup ideò un test molto solido per capire quali specie si riconoscono allo specchio, cosa che indica che hanno un senso dell'io.

Il suo test è semplice. Portate l'animale davanti allo specchio lasciandogli il tempo di conoscerlo, in modo che familiarizzi con il suo riflesso. (C'è un affascinante video di alcuni scimpanzé che ballano eccitati davanti allo specchio insieme alle loro immagini. Ma pensano di ballare con un altro scimpanzé, o stanno ammirando i propri movimenti?) A un certo punto, lo sperimentatore porta via l'animale e, mentre gli strofina la faccia, traccia di nascosto un segno rosso sotto il suo occhio, in modo tale che l'animale non se ne accorga e non possa vederlo senza guardarsi nello specchio. Gallup voleva quindi sapere come avrebbe ora reagito l'animale di fronte alla propria immagine.

Se guardandovi allo specchio notate qualcosa di strano sulla vostra guancia, la vostra prima reazione sarà quella di toccare il punto per scoprire che cos'è. Il test di autoriconoscimento allo specchio di Gallup rivela il sorprendente fatto che gli esseri umani appartengono a un gruppo assai ristretto di animali in grado di

passare sistematicamente questo test di coscienza o consapevolezza di sé: Gallup, infatti, poté accertarsi che le uniche altre specie capaci di reagire in un modo simile al nostro erano gli scimpanzé e gli orangutan. Una terza specie è stata aggiunta all'elenco nel 2001, con la pubblicazione delle ricerche di Diana Reiss e Lori Marino sui delfini dal naso a bottiglia (*Tursiops truncatus*).

Pur non avendo mani con cui toccare un segno, quando venivano segnati i delfini passavano molto più tempo davanti agli specchi nelle loro vasche. Non erano interessati ai segni sugli altri delfini, cosa che indicava una certa consapevolezza del fatto che l'immagine nello specchio non fosse semplicemente un altro animale. Oltre agli orangutan, agli scimpanzé e ai delfini, ci sono evidenze del superamento del test da parte di altri singoli esemplari: una gazza particolarmente intelligente, un elefante. Di certo, però, non ci sono altre specie nel loro complesso che passano sistematicamente il test.

È sorprendente notare che gli scimpanzé iniziano a non superare il test quando raggiungono i trent'anni, nonostante abbiano ancora 10-15 anni di vita davanti a sé. La ragione potrebbe essere che la consapevolezza di sé ha un costo. La coscienza permette al cervello di viaggiare mentalmente nel tempo: potete pensare a come eravate nel passato e proiettarvi nel futuro. Ed è per questo, secondo Gallup, che gli scimpanzé avanti negli anni preferiscono perdere la loro capacità di essere consci di se stessi: il prezzo da pagare per la consapevolezza della propria esistenza è infatti quello di doversi confrontare con l'inevitabilità della propria dipartita. La consapevolezza della morte è il prezzo che paghiamo per essere coscienti di noi stessi. Ciò solleva l'interessante questione di capire se la demenza negli esseri umani abbia un ruolo simile, proteggendo gli uomini in età avanzata dal doloroso riconoscimento della loro morte imminente.

Certo, il test dell'autoriconoscimento allo specchio è un modo molto rudimentale di valutare la coscienza che viene a favorire le specie con un senso della vista molto sviluppato. I cani, per esempio, non hanno una buona vista ma si affidano all'olfatto per identificare i loro simili; per loro, quindi, sarebbe difficile passare un test di questo tipo, anche qualora avessero un senso dell'io altrettanto sviluppato. Ma anche per quelle specie che hanno nella vista il senso primario con cui si orientano nel mondo, questo test di autoconsapevolezza resta comunque molto grezzo. Esso, tuttavia, ha conseguenze sorprendenti quando viene applicato agli esseri umani, in quanto possiamo usarlo per scoprire quando il cervello va

incontro a una qualche transizione in seguito alla quale iniziamo a riconoscere la nostra immagine allo specchio.

Non penso che i miei figli, quand'erano bambini piccoli, avessero lo stesso senso dell'io che hanno ora; ma in quale momento hanno iniziato a reagire come gli scimpanzé di fronte a un segno tracciato di nascosto sulle loro facce? Sappiamo che un bambino di 16 mesi continua a giocare di fronte allo specchio senza curarsi minimamente del nuovo segno, anche se magari lo toccherà con la mano per indagare l'immagine un po' diversa dal solito.

Se però mettiamo davanti allo specchio un bambino di 24 mesi, vedremo che porterà subito le mani al volto per controllare la strana macchia; questa forte reazione indica che riconosce l'immagine e pensa: Quello sono io. Così, durante lo sviluppo del cervello avviene qualcosa che ci porta a diventare coscienti di noi stessi; ma resta ancora un mistero di che cosa si tratti.

Se negli esseri umani la coscienza emerge fra i 18 e i 24 mesi, possiamo porci questa stessa domanda su una scala, diciamo, cosmica: quando è comparsa per la prima volta la coscienza nell'universo? Di certo, subito dopo il Big Bang non c'era nulla che si fosse evoluto abbastanza da qualificarsi come cosciente. Deve quindi esserci un momento in cui si è verificata la prima esperienza cosciente. Così, la coscienza ha probabilmente una qualità diversa dalla gravità o dal tempo (anche se, di fatto, pure riguardo a queste due ultime cose iniziamo a chiederci quando siano emerse o quanto siano fondamentali).

Lo psicologo americano Julian Jaynes, scomparso nel 1997, ipotizzò che l'emergere della coscienza negli esseri umani potrebbe contribuire a spiegare la creazione del concetto di Dio. Con l'evoluzione della coscienza, infatti, arrivò anche l'inquietante consapevolezza di una voce nella nostra testa; può darsi, secondo Jaynes, che Dio sia stato introdotto come un modo per cercare di dare un senso a questo nuovo mondo interiore.

Mentre leggete queste parole, è probabile che ne udiate il suono nella vostra testa. Ciò fa parte del nostro mondo cosciente. In realtà, però, queste parole non vengono pronunciate ad alta voce o sentite da qualcun altro: appartengono al vostro mondo interiore, e soltanto al vostro. Jaynes credeva che, con l'emergere della nostra coscienza durante l'evoluzione, lo shock di sentire questa voce nelle nostre teste potrebbe aver dato origine all'idea di un'intelligenza trascendente, qualcosa che non apparteneva a questo mondo, e ciò portò il cervello a interpretarla come la voce di Dio.

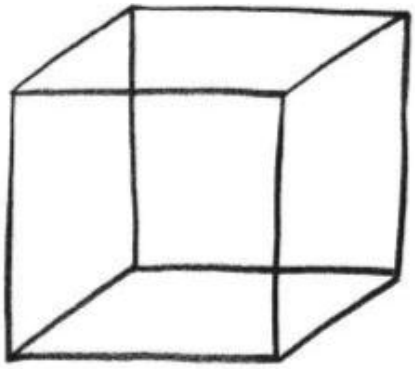
L'idea che il nostro mondo interiore sia vicino al concetto trascendente di Dio è centrale in molte pratiche religiose orientali, inclusa la tradizione vedica. Brahman, l'essere trascendente supremo della religione indù, è spesso identificato con Atman, il concetto del sé.

È piuttosto divertente notare che Jaynes credeva possibile stabilire la data dell'emergere della coscienza nell'evoluzione umana: la collocava intorno all'VIII secolo a.C., tra la stesura dell'*Iliade* e quella dell'*Odissea* di Omero. Nei personaggi dell'*Iliade* non c'è traccia di mondi interiori, di introspezione o di coscienza: i protagonisti dell'assedio di Troia sono semplicemente mossi come marionette dagli dèi. Nell'*Odissea*, invece, vediamo in Odisseo i chiari segni dell'introspezione e della consapevolezza di sé: in lui si coglie una coscienza che non si mostrava nei personaggi dell'*Iliade*.

Inganni della mente

Uno dei piaceri di leggere un libro come l'*Odissea* o l'*Iliade* consiste nell'immergersi in un altro mondo. Un buon libro può rendervi del tutto inconsapevoli di ciò che vi circonda. Il cervello è diventato molto abile nel filtrare ciò che raggiunge la vostra coscienza: voi non volete essere consapevoli dell'intera gamma di input sensoriali che ricevete, in quanto ne rimarreste sopraffatti. Ma la cosa sorprendente è che il vostro cervello è in grado di passare da una percezione cosciente all'altra senza nessun cambiamento negli input esterni.

Il mio esempio preferito per illustrare questo passaggio di percezione cosciente è dato dalla reazione del cervello a uno schizzo del mio dado da casinò. Che cosa vedete?



All'inizio pare essere un cubo con un quadrato in posizione di preminenza; poi però, mentre lo fissate, il cubo cambia

all'improvviso e sembra che davanti ci sia un altro quadrato. L'immagine – nota come il cubo di Necker – non è cambiata, ma ciò di cui abbiamo coscienza sì. Che cos'è successo nel cervello? La coscienza è davvero soltanto una storia che il nostro cervello racconta sugli input sensoriali da esso ricevuti attraverso l'interazione del corpo con il mondo?

Un altro straordinario esempio di come il cervello elabora i dati visivi in modi sorprendenti mi è stato mostrato dal neuroscienziato Christof Koch, una delle figure di spicco nel panorama delle attuali ricerche sulla coscienza. Il tema della coscienza è stato per anni qualcosa di cui uno scienziato serio non avrebbe ammesso volentieri di occuparsi: era infatti visto come appannaggio di chi si dedicava alle discipline umanistiche, non come un soggetto da studiare in laboratorio. Quando però il premio Nobel Francis Crick rivolse la sua attenzione dalle ricerche sul DNA al come il cervello genera la coscienza, il tema venne all'improvviso sdoganato e considerato serio da parte degli scienziati. Koch, più giovane di quarant'anni rispetto a Crick, ha collaborato con lui nel sondare questo problema.

Ho incontrato per la prima volta Koch in cima a Mount Baldy, vicino a Pasadena (la sede del Caltech, dove all'epoca lavorava). Abbiamo deciso di vederci lì perché era a metà strada sul percorso di una delle epiche corse che Koch ama fare. Mi vergogno di dire che ho declinato il suo invito a unirmi a lui nella corsa e ho barato prendendo lo skilift per arrivare in vetta. Prima di affrontare lo spinoso tema della coscienza, sono stato distratto da un tatuaggio che Koch sfoggia sulla spalla: mi sembrava il logo della mela morsicata usato dalla Apple.

«Me lo sono fatto fare nel 2000, mentre ero a uno scavo archeologico in Israele insieme a mio figlio. Il computer Apple è uno degli artefatti più belli ed eleganti del XX secolo. Un connubio perfetto tra forma e funzione.»

Penso sia convinto che, per comprendere la cultura di oggi, questo logo avrà un'importanza analoga a quella dei vasi che stava dissotterrando per capire la Cesarea di Erode nel 20 a.C. Koch parla spesso del suo computer Apple e continua a chiedersi se questo un giorno potrà diventare cosciente e mettersi a discutere con lui. L'altro amore sono i suoi cani, a cui attribuisce un livello di coscienza molto più elevato di quello loro riconosciuto. È stata proprio tale convinzione a farlo diventare vegetariano.

«Dato che è probabile che i mammiferi possano provare coscientemente i dolori e i piaceri della vita, che possano essere

felici o tristi, noi dovremmo evitare di mangiare la loro carne. Quando è maturata in me questa consapevolezza, è stato comunque difficile darle immediatamente seguito nei fatti: il gusto della carne è radicato molto in profondità.»

L'area di competenza neurologica di Koch è la visione, e con un foglio A4 che teneva in tasca mi ha illustrato come la vista ci offra qualche interessante intuizione su come le cose raggiungono le nostre menti coscienti.

Koch mi ha dato la carta e mi ha chiesto di arrotolarla a cilindro per farne un telescopio; quindi, mi ha detto di portare il telescopio al mio occhio destro e, lasciando aperto il sinistro, di tenere la mia mano sinistra aperta a una breve distanza dall'occhio sinistro.

«Ora guardi le montagne laggiù. Che cosa vede?»

Mentre guardavo il panorama, non riuscivo a smettere di ridere: mi sembrava di avere un buco nella mano!

Koch mi ha spiegato che il cervello sta tentando di elaborare due set di informazioni che sembrano in contraddizione con l'esperienza; così, ciò che arriva alla mia coscienza è una fusione di ciò a cui il cervello pensa che sarò interessato. Pertanto, mi ritrovavo a vedere una parte della mia mano, dalle informazioni visive giunte attraverso l'occhio sinistro, ma anche il piccolo cerchio al centro del telescopio, dal mio occhio destro; e dato che le due immagini erano sovrapposte, sembrava che avessi un buco nella mano. Koch ritiene che il modo in cui il cervello decide ciò che deve arrivare alla mia coscienza potrebbe aiutarci a comprendere meglio la coscienza stessa.

Possiamo quindi usare i nostri nuovi telescopi neurali per vedere che cosa succede quando il nostro cervello diventa conscio di una cosa o di un'altra? Stando alle ricerche di Koch, sembra che i nervi

retinici non mandino informazioni differenti; pertanto, il cambiamento nella nostra esperienza cosciente avviene più avanti, nel cervello. Il problema è che gli scanner fMRI ed EEG sono troppo grezzi per cogliere dei cambiamenti sottili come il passaggio fra i due modi di vedere il cubo di Necker. Nel 2004, però, Koch e il suo team al Caltech hanno individuato l'opportunità di porre a un singolo neurone delle domande su che cosa lo stimolava ad accendersi, il che ha portato alla scoperta di una curiosa attività neuronale.

Il neurone di Jennifer Aniston

Le crisi epilettiche possono essere provocate da collegamenti neurali sbagliati o tessuti cicatriziali che innescano l'accensione sincronizzata dei neuroni in tutto il cervello, un po' come la reazione a catena di una bomba atomica che esplode nella testa. In alcuni casi, la rimozione di una piccola sezione del cervello può prevenire tali crisi eliminando la causa scatenante.

Per localizzare la fonte dell'attacco epilettico ed evitare di rimuovere una quantità eccessiva di tessuti, ai pazienti vengono inseriti circa 20 elettrodi nei tessuti molli del cervello attraverso dei buchi fatti nel cranio; sembra una sorta di tortura medievale, ma di fatto è una procedura diffusa nell'odierna pratica medica. Da ogni elettrodo escono dei cavetti, sottili quanto un capello, collegati a una regione di circa 10-50 neuroni: se uno di questi neuroni si accende, la sua attività elettrica viene rilevata dall'elettrodo. Il chirurgo attende quindi che il paziente abbia una crisi e, a quel punto, è possibile fare una registrazione dell'accensione dei neuroni attraverso il cervello; da qui, con un'analisi matematica dei dati, si può identificare la potenziale fonte.

Non è tuttavia detto che la crisi avvenga subito; così, nell'attesa, i pazienti sono costretti a rimanere in corsia con i loro elettrodi a girarsi i pollici. Il team del Caltech vi ha individuato un'opportunità: perché non approfittare di questo tempo per porre loro delle domande e vedere quali provocano l'accensione dei neuroni? La fonte più comune degli attacchi epilettici è la regione del cervello dove sono immagazzinate le memorie; dato che la maggior parte degli elettrodi era attaccata lì, i ricercatori hanno deciso di verificare quale attività elettrica veniva rilevata all'attivarsi dei ricordi; per suscitarli mostravano ai pazienti una svariata gamma di immagini.

Occorreva interrogare i pazienti per un po', ma i risultati erano sorprendenti. In un caso, i neuroni si accendevano solo quando venivano mostrate delle foto di Jennifer Aniston. A prescindere da com'era vestita o dal colore dei suoi capelli, il neurone sembrava accendersi in riconoscimento del concetto dell'attrice; bastava anche solo il suo nome scritto sulla carta per far sì che si attivasse.

In un certo senso, non c'era nulla di nuovo in quella scoperta. Per codificare ricordi, idee e concetti, il cervello deve trovare un modo di convertire i dati nell'attività neuronale. Come una foto digitale della Aniston è un modo di trasformare la sua immagine in una serie di 0 e di 1, così i nostri cervelli prendono i dati sensoriali che ci bombardano e decidono se l'attrice è abbastanza importante da essere codificata come concetto; se lo è, le sinapsi attualmente connesse a quel neurone si rafforzeranno e sopravvivranno, garantendo che il neurone continuerà ad accendersi quando il cervello riceverà l'informazione visiva associata. Ogni concetto avrà la sua peculiare catena sinaptica di attività neuronale. Ho apprezzato, in particolare, il paziente con un neurone che si accendeva ogni volta che gli mostravano un'immagine del teorema di Pitagora: era un neurone dotato di maggior discernimento.

La novità sta forse nella selettività con cui il neurone si accendeva. Non sembrava interessato a nessun'altra immagine. Come mi ha spiegato Koch, i ricercatori non stanno certo sostenendo che questo neurone sia l'unico coinvolto nel codificare l'idea della Aniston (o di Pitagora); sarebbe una strategia estremamente inefficiente. L'esperimento era limitato nel numero di neuroni che potevano essere interrogati. Sembra molto probabile che il cervello abbia una selezione di neuroni che si attivano per codificare il concetto della Aniston, come i bit che si accendono nel mio smartphone, assumendo il valore 1, per registrare una fotografia digitale. Koch ritiene però che il numero di neuroni coinvolti in questa codifica sia notevolmente ridotto, nell'ordine di qualche centinaio o forse migliaio (contro i milioni di bit che sarebbero necessari a codificare queste immagini in un computer).

Questo processo di codifica sarà di grande importanza per comprendere i cosiddetti qualia. Un qualia è una qualità o una proprietà come viene percepita o esperita da qualcuno. Prendiamo il colore rosso: a prescindere che stiate guardando il mio dado da casinò, una maglietta dell'Arsenal o la croce sulla bandiera di San Giorgio, farete comunque esperienza di una sensazione di rosso. La sfida è determinare se i vostri qualia siano simili ai miei, o se vengano percepiti anche dagli animali o dai computer.

Posso immaginare che la natura matematica della codifica dei concetti nel cervello potrebbe catturare differenti qualia. Se pensiamo ai neuroni che si accendono davanti all'immagine di una maglietta dell'Arsenal o di un pomodoro, i risultati di Koch ci suggeriscono che possiamo pensarlo come un nome in codice di miliardi di 0 e di 1 che si accendono nel cervello quando il concetto viene riconosciuto. Questi differenti nomi in codice possono essere visti come punti o forme designanti, come cristalli in spazi geometrici iperdimensionali. Le forme di queste geometrie codificano differenti qualia? Tra le forme delle codifiche di una maglietta dell'Arsenal e del mio dado da casinò c'è qualcosa in comune che significa che percepiamo la sensazione del rosso?

Questa potrebbe anche essere la fonte della sinestesia? Forse in alcuni cervelli la codifica del qualia del rosso ha una forma molto simile a quella che codifica il concetto del numero 7, al punto che quando il cervello riconosce il concetto di 7 si accende anche la sensazione del rosso.

Ritornando al telescopio di carta e al buco nella mia mano, Koch mi ha spiegato che è possibile modificare leggermente l'esperimento per testare se l'essere coscienti di qualcosa corrisponde all'accensione di questi neuroni. Supponiamo di avere due telescopi di carta, uno per occhio. All'estremità di un telescopio metto una foto di Jennifer Aniston, che di sicuro farà accendere nel mio cervello i neuroni dell'attrice. Ora però faccio apparire un'immagine del teorema di Pitagora all'estremità dell'altro. Di nuovo, il cervello deve scegliere quale immagine raggiungerà la mia coscienza.

Ciò che tendenzialmente succede in questi esperimenti è che l'immagine di Jennifer Aniston scompare dalla nostra coscienza per lasciare il posto alla nuova immagine ricevuta dal cervello. L'immagine del teorema di Pitagora prende la precedenza, così che il soggetto non è più consapevole di quella della Aniston benché il cervello continui a ricevere il medesimo input sensoriale.

Possiamo quindi osservare un cambiamento nell'attività cerebrale corrispondente a quello nella coscienza? Esperimenti simili a quelli condotti sui pazienti epilettici sono stati fatti sulle scimmie, e indicano che i neuroni che si accendono in riconoscimento di un determinato concetto smettono di accendersi quando viene introdotta una seconda immagine.

Direi che questo ci aiuta a concentrarci sul fatto che nell'attività elettrochimica del cervello c'è qualcosa che contribuisce a determinare ciò di cui siamo consapevoli. Ciò può sembrare ovvio,

ma supponete di pensare che la coscienza sia il risultato di una cosa fisica o di una forza non ancora scoperte – o di qualcosa di totalmente diverso. In tal caso, se i neuroni continuano ad accendersi anche quando non siamo più coscienti dell'immagine di Jennifer Aniston, ciò verrebbe a corroborare l'idea secondo la quale il motivo per cui all'improvviso non siamo più stati coscienti dell'immagine è dipeso da qualcos'altro. Sarebbe stato questo qualcos'altro a spegnere l'esperienza cosciente precedente.

Questa capacità di spegnere e accendere la nostra esperienza cosciente di qualcosa sta al centro delle azioni di molti maghi e illusionisti. Ricordo ancora bene una serata con i membri della Royal Society durante la quale Richard Wiseman, un professore di psicologia dell'Università dell'Hertfordshire, ci mostrò un filmato in cui due squadre erano intente a passarsi due palloni da basket. «Voglio che contiate quanti passaggi di palla fa la squadra nera» ci chiese Wiseman. Con una classica mossa da illusionista, ci venne data una falsa pista per fare in modo che concentrassimo tutti la nostra attenzione su quel particolare compito: «Uomini e donne tendono a contare i passaggi in modo differente».

Il video venne proiettato e tutti ci mettemmo a contare. Al termine, Wiseman chiese chi aveva contato 17 passaggi. Diverse mani si alzarono. 18 passaggi? Qualcun altro si fece avanti. «E chi di voi ha visto l'uomo vestito da gorilla che è andato al centro del campo, si è battuto il petto e poi si è allontanato?» Che cosa?! Io non avevo visto nulla del genere. Pensavo che ci stesse prendendo in giro, finché due persone in sala non hanno alzato la mano; non si erano preoccupate di concentrarsi sul conteggio dei passaggi e, con la loro attenzione libera di vagare, avevano notato l'uomo vestito da gorilla. Il mio cervello, invece, non aveva offerto questa informazione alla mia esperienza cosciente. Fu un insegnamento importante per gli scienziati seduti nella sala della Royal Society: concentrarsi troppo su una singola cosa può impedirvi di vedere il gorilla che sta proprio davanti ai vostri occhi.

In qualità di matematico ricercatore, quest'idea delle cose che entrano ed escono dalla coscienza mi è familiare. Molte volte ho la sensazione che il lavoro che faccio davanti alla scrivania getti i semi di idee che spesso vengono a frutto dopo che mi sono allontanato dalla postazione. Credo che queste intuizioni improvvise di cui la gente spesso parla siano un risultato di come il cervello continua a lavorare a livello subconscio per risolvere un problema e quindi, quando trova una corrispondenza, la manda alla mente cosciente assieme a una scarica di dopamina per assicurarsi che venga notata.

Di certo, la scoperta matematica di cui vado più orgoglioso mi è venuta in mente proprio in questo modo. Avevo lavorato tutto il giorno al Max-Planck-Institut di Bonn, cercando di venire a capo di uno spinoso problema che stavo affrontando insieme a un collega. Nulla sembrava funzionare. Era ormai sera quando smisi di pensarci a livello conscio e, mentre cercavo di telefonare a mia moglie a Londra, «vidi» all'improvviso un nuovo oggetto simmetrico dalle strane e inattese proprietà. Annotai in fretta sul mio block-notes giallo l'idea che era affiorata all'improvviso, e ancora oggi trovo straordinario il modo in cui questa cosa – un oggetto che non avevo mai concepito prima – apparve alla mia mente nel momento in cui ero al telefono a Bonn. Fu come se questo nuovo oggetto matematico, dopo essere stato elaborato nel mio subconscio, fosse entrato nel mio cervello cosciente accompagnato da una scarica chimica per assicurarsi di non passare inosservato. Tuttavia, che cosa sia successo esattamente perché io potessi avere quell'esperienza resta un mistero.

Esperienze extracorporee

Il telescopio di carta di Koch mostra come sia facile confondere la nostra vista e cambiare il modo in cui percepiamo l'ambiente che ci circonda. Ci sono però modi ancora più spettacolari di ingannare il cervello: giocando con diversi sensi allo stesso tempo, è possibile alterare in modo drammatico la nostra coscienza, fino al punto che il nostro stesso senso dell'io può spostarsi all'esterno del nostro corpo.

Uno degli esempi più sorprendenti di questa possibilità è dato dal cosiddetto effetto McGurk. Su YouTube troverete un video che lo illustra. Dopo averlo visto, comprenderete lo straordinario potere del cervello di creare esperienze coscienti di cose che in realtà non ci sono.

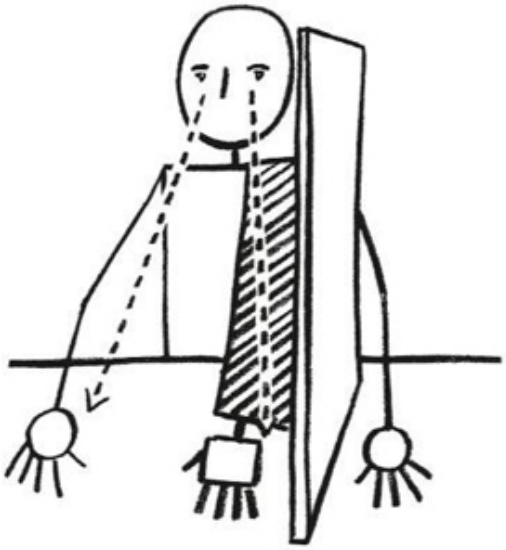
L'illusione inizia quando ascoltate guardando un volto che sembra articolare i suoni «Fa… Fa… Fa». Tuttavia, chiudendo gli occhi, il suono si trasforma all'improvviso nei fonemi «Ba… Ba… Ba». Il suono era questo fin dal principio, ma vedendo una faccia che fa i movimenti associati al suono «Fa», il vostro cervello era confuso dagli input contraddittori. Essendo sempre alla ricerca di una singola esperienza cosciente integrata, il cervello trova un'interpretazione coerente con la vostra precedente esperienza e questo è ciò che

arriva alla vostra coscienza. Quando si tratta di integrare i diversi sensi, capita spesso che la vista abbia la meglio sull'udito.

A differenza di quanto avviene nel caso dell'uomo vestito da gorilla, qui anche quando sapete che cosa sta succedendo è molto difficile far sì che il vostro cervello senta «Ba» mentre guardate la bocca che produce il suono di «Fa». Il cervello è alla ricerca di schemi e tenta di imporre una struttura alla cacofonia di informazioni da cui viene bombardato; e quando le informazioni sono ambigue, come nei casi del cubo di Necker o dell'effetto McGurk, deve fare una scelta.

Queste illusioni sono un monito per tutti noi che cerchiamo di conoscere qualcosa sul nostro universo. Noi non abbiamo un accesso privilegiato alla realtà: la nostra interazione con l'ambiente circostante è costruita a partire dalle informazioni ricevute dai nostri cervelli, di cui ci serviamo per costruire una rappresentazione plausibile del mondo esterno. Questa combinazione di sensi diversi presenta alcune stranissime implicazioni a proposito della localizzazione della nostra coscienza.

La partecipazione a un esperimento al Karolinska Institutet, in Svezia, mi ha portato a chiedermi seriamente dove penso che si trovi il mio io. Messo a punto nel 2007 da Henrik Ehrsson, l'esperimento è riuscito a farmi avere l'impressione che la mia coscienza si trovasse di fatto nel corpo di un'altra persona. Questo lavoro si ispira a un famoso esperimento noto come l'illusione della mano di gomma, nel quale una mano del soggetto viene nascosta alla sua vista dietro uno schermo e al suo posto viene messa davanti ai suoi occhi una mano di gomma, collegata al corpo tramite una manica. All'inizio, il soggetto la vede per quello che è: una mano finta. Ma se lo sperimentatore inizia a dare dei colpetti sia sulla mano di gomma (visibile) sia su quella vera (nascosta), facendo in modo che le azioni siano sincronizzate, avviene uno strano cambiamento.



La combinazione degli stimoli visivo e tattile è ambigua e il cervello cerca quindi di dare un senso a ciò che accade. Anche in questo caso, la vista è dominante, e il soggetto inizia così a identificarsi con la mano finta (al punto che quando a quest'ultima viene avvicinato un martello, spesso reagisce come se venisse attaccato). La combinazione del senso della vista e di quello del tatto ha ingannato il cervello, portandolo a identificarsi con la mano di gomma. La cosa più sorprendente è la plasticità del cervello, che in una sola manciata di minuti è riuscito a riprogrammarsi identificandosi con una mano finta.

Al Karolinska Institutet, questa combinazione di input visivi e tattili è stata portata a uno stadio più avanzato. Molti dei progressi nelle neuroscienze sono dovuti allo sviluppo di nuove tecnologie; in questo caso, entrano in gioco degli occhiali per la realtà virtuale. Mi è stato chiesto di indossarli mentre Ehrsson si metteva in testa una specie di tocco accademico con due telecamere sopra, che sarebbero diventate i miei occhi. Quando il video ripreso dalle due telecamere sopra la testa di Ehrsson è stato trasmesso ai miei occhiali, mi sono ritrovato a vedere il mondo dalla sua prospettiva. Fin qui, nulla di troppo strano. È stato quando mi ha chiesto di stringergli la mano che le cose sono diventate un po' surreali.

Mentre ci davamo la mano, Ehrsson mi ha chiesto di stringere la sua con un ritmo regolare che lui avrebbe a sua volta seguito, e questa combinazione di vista e tatto mi ha portato a identificarmi sempre di più con il braccio che, da quanto vedevo, sembrava emanare dal mio corpo. La cosa strana era che quel braccio che stavo guardando non apparteneva a me, ma a Ehrsson. L'identificazione era talmente forte che quando Ehrsson ha preso un coltello e lo ha avvicinato alla sua mano, ho reagito come se fosse la

mia a correre il rischio di essere tagliata. Negli anni seguenti, Ehrsson ha spinto questa illusione ancora più in là, fino a dare ai partecipanti l'impressione che la loro coscienza si trovasse in una Barbie.

Questo genere di effetti era in precedenza confinato nel mondo cinematografico. Negli ultimi anni, diversi film di fantascienza – tra cui *Avatar* e *Il mondo dei replicanti* – hanno esplorato l'idea delle esperienze extracorporee. Ma dopo aver preso parte agli esperimenti di Ehrsson, mi chiedo solo quanto tempo ci vorrà prima che io possa mandare un mio avatar a un concerto o in cima all'Everest e avere l'impressione – attraverso la ricezione nel mio corpo, rimasto tranquillamente a casa, degli impulsi sensoriali da esso registrati – di trovarmi di fatto nella sala per concerti o sul tetto del mondo.

Mente-corpo

Questi esperimenti vanno al cuore della spinosa questione nota come il problema mente-corpo. La coscienza è separata dal corpo fisico? Certo sembra che sia da esso creata, ma andrebbe considerata come qualcosa di distinto dall'hardware fisico? Che cosa significa, per la mente, il fatto di trovarsi in un corpo? Qualcuno ha sostenuto che la mente è qualcosa di indipendente dal corpo. Cartesio, per esempio, la vedeva in questo modo.

Il cosiddetto dualismo postula che il mondo mentale è separato da quello fisico. «Anima» è una parola che alcuni hanno usato per descrivere l'«altra cosa» che esiste in questo mondo mentale. La questione di quanto quest'altra cosa sia indipendente dal corpo a cui è connessa fa parte del dibattito. Gli esperimenti di Ehrsson che vengono a spostare il luogo dove quest'altra cosa – di qualunque cosa si tratti – sembra trovarsi mettono in discussione il nostro senso dell'unità spaziale di mente e corpo. Il senso dell'io, comunque, pare molto dipendente dal corpo, in quanto è manipolando gli input sensoriali che sembriamo in grado di giocare con la natura della nostra esperienza cosciente.

Da un certo tempo c'è una crescente tendenza a parlare di fenomeni emergenti, un'espressione coniata per indicare come certe cose sorgono da entità più fondamentali e tuttavia sono esse stesse fondamentali e irriducibili. L'idea è emersa di passaggio nel precedente Confine, dove abbiamo preso in considerazione l'ipotesi che il tempo sia emergente e non fondamentale. Quando applicato

alla coscienza, il concetto di emergenza rappresenta un tentativo di trovare una via di mezzo tra il riduzionismo più spinto e il dualismo di Cartesio, dove la coscienza è come uno spettro in una macchina. L'umidità costituisce il classico esempio di un fenomeno emergente: una molecola di H_2O, infatti, non è umida; perché l'umidità appaia, occorre mettere insieme molte molecole.

Oggi molti neuroscienziati affermano che la coscienza è simile all'umidità dell'acqua. È probabile che la coscienza sia un fenomeno emergente, nel senso che sorge come una proprietà di livello superiore di un sistema per via dell'attività neuronale prodottasi a un livello inferiore. Ciò, tuttavia, non ci offre ancora una vera spiegazione di che cosa sia, di fatto, questa cosa di livello superiore.

Secondo qualcuno, in realtà, il concetto di emergenza è soltanto un modo con cui i chimici e i biologi rivendicano che la loro materia è distinta dalla fisica e dalla matematica, anziché un mero corollario di queste scienze. Un riduzionista spinto vi dirà che una reazione chimica o un processo biologico è soltanto un'equazione matematica che descrive la fisica in azione. Questo spirito riduzionista è racchiuso alla perfezione in una delle mie vignette preferite del sito xkcd.com.

Appartenendo al gruppo che sta in cima, ho sempre apprezzato la posizione distaccata dell'altezzosa matematica sull'estrema destra. L'emergenza è il concetto inventato da quelli sulla sinistra per sconvolgere tale quadro.

Spesso mi chiedo se la matematica ci offra un buon esempio di dualismo, qualcosa che esiste in un regno puramente mentale, distaccato dal mondo fisico. Certo, il nostro stesso accesso a questo mondo dipende dalla realizzazione fisica della matematica: siamo arrivati alla scoperta di π perché gli antichi egiziani volevano tassare dei terreni che avevano un'area circolare, plasmata dal Nilo. La

natura irrazionale di questo numero, però, significa che nel mondo reale può solo essere approssimato; nondimeno, esso ha una sua realtà nelle nostre menti, qualcosa che può essere definito con precisione ed esplorato logicamente. Dove si trova, quindi?

E l'app sul mio smartphone che sta cercando di convincermi di essere cosciente non è, in realtà, soltanto un codice matematico che avrebbe senso anche senza che il mio telefonino lo portasse in vita? Quando gli chiedo se è soltanto un'entità matematica, Cleverbot mi dà una risposta interessante.

«Potrei esserlo. E tu?»

12

> «Quello che siamo oggi viene dai nostri pensieri di ieri, e i nostri pensieri di oggi costruiscono la nostra vita di domani: la nostra vita è la creazione della nostra mente.»
>
> *Dhammapada*

Qualche anno fa, mia moglie entrò in coma in seguito a un incidente. Trascorsi molte ore all'ospedale chiedendomi se «lei» fosse ancora lì dentro, o se quello fosse soltanto un corpo privo di coscienza. Per fortuna, dopo due settimane si è risvegliata, ma che cosa possiamo dire riguardo a quelle persone che non sono in grado rispondere fisicamente? Per alcuni, il corpo è diventato un insieme di cellule senza nessuna esperienza cosciente: lo stato vegetativo. Per altri, però, c'è il terrificante scenario in cui la coscienza è rinchiusa in un corpo che non risponde più. C'è quindi qualche modo per chiedere al cervello se in queste situazioni è cosciente? Sorprendentemente, la risposta è positiva e ha a che fare con il giocare a tennis – o, meglio, con l'immaginare di giocare a tennis.

Immaginate di giocare a tennis. Grandi diritti, schiacciate al di sopra della testa. Tutto questo richiede la vostra decisione consapevole di partecipare; non è una sorta di risposta automatica a uno stimolo fisico. Tuttavia, una volta che state immaginando le azioni, una scansione fMRI può rilevare l'attività neurale corrispondente all'attività motoria associata ai colpi che pensate di tirare.

La scoperta che potremmo usare l'fMRI per vedere i pazienti nell'atto di prendere decisioni consapevoli è stata fatta dal neuroscienziato britannico Adrian Owen e dal suo team

mentre, all'inizio del 2006, stavano esaminando una ventitreenne che, secondo le diagnosi, si trovava in uno stato vegetativo. Quando alla paziente venne chiesto di immaginare di giocare a tennis, Owen, con sua stessa sorpresa, vide che all'interno dello scanner la regione corrispondente alla corteccia motoria supplementare si accendeva. E quando le venne chiesto di immaginare di spostarsi in casa sua, si attivò un'altra regione chiamata giro paraippocampale, necessaria per muoversi e orientarsi nello spazio. Era una scoperta davvero eccitante, non ultimo perché i dottori, con una nuova diagnosi, stabilirono che la giovane era cosciente ma rinchiusa nel suo corpo.

Questa nuova diagnosi è stata fatta anche per numerosi altri pazienti in precedenza ritenuti in stato vegetativo. In questo modo, i dottori e – cosa più importante – i famigliari possono parlare e fare domande a queste persone consapevoli ma rinchiuse nei loro corpi. Per rispondere affermativamente a una domanda, un paziente può immaginare di giocare a tennis e creare così un'attività, come abbiamo visto, rilevabile dallo scanner. Forse questo non ci dice che cosa sia la coscienza, ma la combinazione del tennis e dell'fMRI ci ha comunque fornito uno straordinario coscienziometro.

Lo stesso protocollo del tennis viene usato per esaminare un altro caso in cui la nostra coscienza viene rimossa: l'anestesia. Di recente, mi sono offerto volontario, come soggetto numero 26, per un progetto di ricerca portato avanti a Cambridge che si propone di esplorare il momento in cui un anestetico mette fuori combattimento la nostra coscienza; ci sono stati infatti alcuni terribili casi di pazienti che, pur non potendo muovere i loro corpi, sono rimasti perfettamente coscienti durante un'operazione.

Nell'esperimento, ho dovuto sdraiarmi all'interno di uno scanner fMRI mentre mi veniva iniettato il propofol, il farmaco a cui Michael Jackson si era assuefatto prima di morire; devo ammettere che dopo un po', provando l'effetto estremamente rilassante di questo anestetico, ho iniziato a capire il motivo di quella dipendenza. Io, però, ero lì per lavorare. Incrementando gradualmente la dose, i ricercatori hanno potuto stabilire il momento critico in cui ho perso coscienza e ho smesso di

immaginare di giocare a tennis. La cosa interessante, per me, è stata scoprire in seguito quanto propofol sia stato necessario somministrarmi perché passassi dal momento in cui il mio corpo non era più in grado di muoversi a quello in cui la mia coscienza si è spenta.

La capacità di porre domande al cervello anche quando il resto del corpo non è in grado di muoversi o di comunicare ha permesso ai ricercatori di determinare quanto anestetico è necessario per spegnere temporaneamente la coscienza di un paziente in modo da poterlo operare.

Questo coscienziometro basato sul tennis ci introduce inoltre al tema dello stretto rapporto fra coscienza e libero arbitrio: il soggetto deve scegliere di immaginare di giocare a tennis. Tuttavia, alcuni esperimenti condotti di recente per osservare il cervello in azione hanno messo radicalmente in discussione la reale portata del nostro libero arbitrio.

Ho davvero il controllo?

Sono sicuro che, quando avete deciso di leggere questo libro, avete pensato di esercitare il vostro libero arbitrio; e ritenete che prenderlo e arrivare fino a questa pagina sia stata una vostra scelta cosciente. Tuttavia, il libero arbitrio potrebbe essere solo un'illusione.

Gran parte delle ricerche più avanzate nel campo della coscienza sono tuttora in corso. A differenza della scoperta del quark o dell'espansione dell'universo, è possibile assistere a molte di esse mentre vengono condotte, o addirittura prendervi parte. Un esperimento messo a punto dallo scienziato di origini britanniche John-Dylan Haynes è probabilmente il più sconcertante per le sue implicazioni riguardo a quale livello di controllo abbiamo sulla nostra vita.

Spero che non abbiate nulla contro gli scanner fMRI, perché anche in questo caso la mia ricerca per sapere come il cervello crea la mia esperienza cosciente mi ha portato davanti a uno di tali apparecchi, questa volta a Berlino. Mentre ero disteso al

suo interno, mi è stata data una piccola console con due pulsanti da attivare rispettivamente con la mano destra e con la sinistra. Haynes mi ha chiesto di entrare in uno stato di rilassamento simile allo zen, dicendomi che avrei potuto premere il tasto destro o sinistro ogni qualvolta ne avessi sentito il desiderio.

Durante l'esperimento, ho dovuto indossare un paio di occhiali per la realtà virtuale contenenti un minischermo su cui veniva proiettato un flusso casuale di lettere; ogni volta che decidevo di premere uno dei due pulsanti, dovevo prender nota di quale lettera c'era sullo schermo.

Lo scanner fMRI registrava la mia attività cerebrale mentre prendevo le mie decisioni coscienti casuali. Quello che Haynes ha scoperto è che, analizzando la mia attività cerebrale, è possibile predire quale pulsante premerò sei secondi prima che io stesso diventi consapevole di quello che sto per scegliere. Sei secondi è un tempo molto lungo. Il mio cervello decide quale pulsante ordinerà al mio corpo di premere, se il destro o il sinistro; poi passano un secondo, due secondi, tre secondi, quattro secondi, cinque secondi, sei secondi – e solo ora la decisione viene inviata alla mia coscienza, dandomi l'impressione che io stia agendo di mia volontà.

Haynes può vedere quale pulsante sceglierò perché nel cervello c'è una regione che si attiva sei secondi prima che io lo schiacci, preparando l'attività motoria. Una regione differente si attiva a seconda che il cervello stia preparando il dito sinistro o quello destro. Haynes non è ancora in grado di predire la scelta con una certezza del 100 per cento, ma le sue predizioni sono indubbiamente più accurate di quelle che potrebbe fare tirando a indovinare; ed è convinto che, utilizzando strumenti di scansione più avanzati, ci si potrebbe avvicinare a una precisione del 100 per cento.

Va sottolineato che questo è un processo decisionale molto particolare. Se, mettiamo, state avendo un incidente, il vostro cervello prende le decisioni in una frazione di secondo, e il vostro corpo reagisce senza bisogno che ci sia un'attività cosciente. Nel cervello, molti processi avvengono in modo automatico e senza coinvolgere la nostra coscienza, per evitare

che il cervello stesso venga sovraccaricato da compiti di routine. Ma che io scelga di premere il pulsante destro o sinistro, non è una questione di vita o di morte; sto prendendo liberamente la decisione di premere il pulsante sinistro.

In pratica, oggi il gruppo di ricerca di Berlino impiega diverse settimane per analizzare i dati dell'fMRI, ma con lo sviluppo delle tecnologie informatiche e di quelle della scansione c'è la possibilità che la coscienza di Haynes arrivi a sapere quale pulsante sto per premere sei secondi prima che la mia stessa coscienza sia consapevole di quella decisione che penso di prendere liberamente.

Anche se sembra che il cervello prepari inconsciamente la decisione molto tempo prima, non è ancora chiaro dove venga presa la scelta finale. Forse io ho comunque la possibilità di annullare la decisione che il mio cervello ha approntato per me. Qualcuno ha suggerito che, se non ho la libertà di volere qualcosa (ossia, un vero e proprio libero arbitrio), forse ho perlomeno la libertà di non volerla: posso cioè cancellare la decisione di premere il pulsante sinistro quando ne divengo consapevole. In questo esperimento, comunque, il pulsante che premo è irrilevante e non sembrano quindi esserci molte ragioni per non accettare la decisione che il mio cervello non cosciente ha preparato per me.

L'esperimento sembra indicare che la coscienza potrebbe essere una funzione molto secondaria del cervello. Sappiamo già che gran parte di ciò che il nostro corpo fa avviene a un livello del tutto inconscio, ma crediamo che quanto ci distingue come esseri umani è il fatto che la nostra coscienza abbia un ruolo attivo nelle decisioni che prendiamo. Ma se la nostra coscienza entra in gioco e ci coinvolge solo alla fine della catena degli eventi? La nostra coscienza di una decisione è solo una riflessione chimica tardiva che non ha nessuna influenza su ciò che facciamo? Quali sarebbero le implicazioni sul piano legale e morale? «Mi dispiace, signor giudice, ma non sono stato io a sparare alla vittima. Il mio cervello aveva già deciso sei secondi prima che avrei premuto il grilletto.» Siete avvertiti: il determinismo biologico non è una linea di difesa accettata in tribunale!

La pressione dei pulsanti nell'esperimento di Haynes, come ho già detto, non aveva conseguenze pratiche, il che potrebbe alterare i risultati. Forse, se si fosse trattato di qualcosa di cui mi importava di più, la parola non sarebbe andata tutta al mio subconscio. Haynes ha ripetuto l'esperimento con un'attività un po' più interessante sotto il profilo intellettuale: ai partecipanti viene chiesto di sommare o sottrarre un numero a quelli mostrati su uno schermo. Anche in questo caso, però, la decisione di sommare o sottrarre è indicata dall'attività cerebrale registrata quattro secondi prima della decisione cosciente di agire.

Ma se prendiamo l'esempio proposto dal filosofo francese Jean-Paul Sartre di un giovane che deve scegliere tra unirsi al movimento di resistenza o prendersi cura di sua nonna? Forse in questo caso la deliberazione cosciente avrà un ruolo molto più determinante sull'esito e salverà il libero arbitrio dallo scanner fMRI. Magari le azioni compiute negli esperimenti di Haynes sono già in partenza troppo simili alle risposte automatiche subconscie. Di sicuro, molti dei miei atti emergono nella mia consapevolezza solo in un momento successivo, perché non occorre che la mia coscienza sappia molto su di essi. Il libero arbitrio è sostituito dalla libertà di indifferenza.

L'attività cerebrale preconscia potrebbe comunque essere soltanto uno dei fattori che contribuiscono alla decisione presa al momento della deliberazione cosciente. Non rappresenta necessariamente l'unica causa, ma concorre a formare la decisione; presenta una possibilità da tenere in considerazione.

Se siamo dotati di libero arbitrio, una delle sfide è quella di comprendere da dove venga. Non penso che il mio smartphone abbia il libero arbitrio: in gioco non c'è nient'altro che un insieme di algoritmi che l'apparecchio può solo limitarsi a seguire in modo deterministico. Giusto per controllare, ho chiesto al mio chatterbot se pensava di agire liberamente, di fare delle scelte. La sua risposta è stata piuttosto criptica: «Sceglierò una strada che sia chiara, sceglierò il libero arbitrio».

So che questa risposta è programmata nell'app. Può darsi che l'app abbia un generatore di numeri casuali che assicura risposte varie e imprevedibili, creando un apparente libero arbitrio: un dado da casinò virtuale che sceglie la sua replica da un database di risposte. Ma la casualità non è libertà: quei numeri casuali vengono generati da un algoritmo i cui risultati hanno necessariamente un carattere casuale. Come abbiamo visto nel Terzo Confine, per avere una qualche chance di asserire il proprio libero arbitrio il mio smartphone dovrà forse attingere alle idee della fisica quantistica.

La fede nel libero arbitrio è una delle cose a cui rimango aggrappato, in quanto credo che rimarchi la mia differenza da un'app dello smartphone; penso che sia per questo motivo che l'esperimento di Haynes mi ha lasciato un profondo senso di disagio. Forse anche la mia mente è soltanto l'espressione di una sofisticata app alla mercé dell'algoritmo biologico del cervello.

Il matematico Alan Turing fu uno dei primi a chiedersi se le macchine come il mio smartphone avrebbero mai potuto sviluppare un pensiero intelligente. Riteneva che un buon test di intelligenza consistesse nel mettersi a comunicare con una persona e con un computer e vedere quindi se si era in grado di riconoscere qual era il computer. È proprio a questo test, oggi noto come il test di Turing, che ho sottoposto Cleverbot all'inizio di questo Confine. Dato che posso valutare l'intelligenza degli altri esseri umani solo interagendo con loro, se un computer riesce a farsi scambiare per un essere umano non dovrei forse considerarlo intelligente?

Ma non c'è una differenza tra una macchina che segue delle istruzioni e il coinvolgimento cosciente del mio cervello in un'attività? Se scrivo una frase in inglese sul mio smartphone, le app caricate possono tradurla in qualunque lingua io voglia; tuttavia, nessuno pensa che lo smartphone capisca ciò che sta facendo. La differenza può forse essere illustrata attraverso un interessante esperimento mentale chiamato la Stanza cinese, ideato dal filosofo John Searle dell'Università della California. Dimostra che la capacità di una macchina di seguire delle istruzioni non implica che sia dotata di una propria mente.

Io non parlo il mandarino, ma immaginiamo che mi mettano in una stanza con un manuale di istruzioni che mi dà una risposta appropriata per ogni stringa di caratteri cinesi che mi vengono presentati; potrei così tenere una discussione convincente con una persona che parla il mandarino senza comprendere nemmeno una parola delle mie stesse risposte. Allo stesso modo, per quanto il mio smartphone sembri parlare molte lingue, nessuno di noi direbbe che comprende ciò che sta traducendo.

Questo esperimento rappresenta una grossa sfida per chiunque pensi che, solo perché una macchina risponde come un'entità cosciente, dovremmo considerarla dotata di una sufficiente misura di coscienza. Certo, potrebbe anche fare tutto ciò che fa una persona cosciente, ma è *davvero* cosciente? Di nuovo, che cosa fa la mia mente quando scrivo delle parole? Non è che sto soltanto seguendo un insieme di istruzioni? È possibile che ci sia una soglia oltre la quale dovremmo accettare il fatto che il computer comprende il mandarino – e, di conseguenza, un'altra soglia oltre la quale l'algoritmo all'opera andrebbe considerato come un'entità dotata di coscienza? Ma prima di poter programmare un computer perché sia cosciente, dobbiamo comprendere che cosa c'è di così speciale nell'algoritmo all'opera in un cervello umano.

Sale la marea

Uno dei modi migliori per venire a capo della correlazione tra coscienza e attività cerebrale consiste nel confrontare cervelli coscienti e cervelli non coscienti. C'è una qualche differenza percepibile nell'attività cerebrale? Non dobbiamo attendere che un paziente sia in coma o sedato dagli anestetici per fare questo confronto, in quanto c'è un'altra situazione in cui ogni giorno – o, meglio, ogni notte – noi perdiamo la nostra coscienza: nel sonno. Ed è proprio la scienza del sonno e di ciò che succede al cervello durante questi periodi non coscienti a permetterci forse di capire meglio che cosa fa il cervello per creare la nostra esperienza della coscienza.

Mi sono quindi recato al Center for Sleep and Consciousness dell'Università del Wisconsin di Madison, dove gli esperimenti condotti dal neuroscienziato Giulio Tononi e dal suo team hanno messo in luce una sorprendente differenza nel comportamento del cervello durante la veglia e il sonno senza sogni.

In passato sarebbe stato impossibile porre delle domande al cervello durante il sonno, ma oggi la stimolazione magnetica transcranica (o TMS) consente agli scienziati di infiltrarsi nel cervello e accendere artificialmente i neuroni. Applicando un campo magnetico a fluttuazione rapida, il team è in grado di attivare specifiche regioni del mio cervello sia quando sono sveglio, sia – ed è la cosa più eccitante – quando sono addormentato. Si tratta quindi di vedere se questa stimolazione artificiale dei neuroni provoca nel cervello cosciente risposte differenti da quelle ottenute durante il sonno.

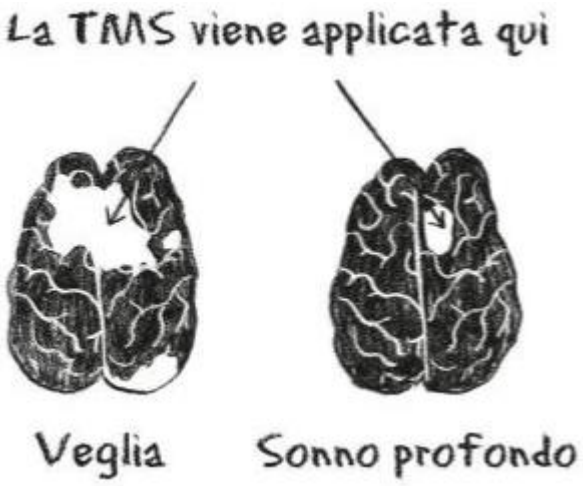
Ero un po' teso all'idea che qualcuno mi attivasse artificialmente il cervello. In fin dei conti, è lo strumento principale di cui mi servo per fare matematica: se lo strapazzano, sono nei guai. Tononi, però, mi ha assicurato che non c'era alcun pericolo. Usando il proprio cervello, uno dei suoi colleghi mi ha fatto vedere come fosse in grado di attivare una regione connessa all'attività motoria della mano. È stato sorprendete vedere come la stimolazione di questa regione provocasse il movimento del suo dito: ogni impulso della TMS era come la pressione di un interruttore nel cervello che faceva muovere il dito. Dato che il collega di Tononi non sembrava risentire dell'esperimento, ho accettato di sottopormi anch'io al test.

Nella prima fase, la TMS è stata applicata a una piccola regione del mio cervello mentre ero sveglio. Gli elettrodi attaccati alla mia testa registravano l'effetto attraverso l'EEG. I risultati hanno mostrato che diverse aree lontane dal punto stimolato rispondono in momenti differenti, secondo uno schema complesso che manda dei feedback al sito attivato dalla macchina. Il cervello, spiega Tononi, interagisce come una rete integrata complessa. I suoi neuroni agiscono come una serie di porte logiche intercorrelate: un neurone può accendersi se la maggioranza dei neuroni a esso connessi si sta

attivando, o magari può accendersi se solo uno dei neuroni connessi è attivo. Quello che vedevo sul tracciato dell'EEG era il flusso logico dell'attività cerebrale causato dall'accensione dei primi neuroni attivati dalla TMS.

La parte successiva dell'esperimento richiedeva che fossi addormentato. Una volta entrato nella fase 4 del sonno (quello profondo), avrebbero applicato la TMS al mio cervello nello stesso punto di prima, stimolando la medesima regione. In sostanza, la TMS attiva gli stessi neuroni, accendendoli come interruttori, e la domanda è quindi: in che modo la struttura della rete viene a cambiare quando il cervello passa da uno stato cosciente a uno stato non cosciente? Purtroppo, questa parte dell'esperimento si è dimostrata troppo difficile per me. Ho il sonno incredibilmente leggero, e il fatto di ritrovarmi con la testa coperta di elettrodi e di sapere che qualcuno attendeva solo che mi addormentassi per stimolare il mio cervello non mi aiutava certo a sprofondare in un sonno tranquillo. Nonostante mi fossi astenuto dal caffè per l'intera giornata, non sono riuscito ad andare oltre la fase 1, con un sonno leggero e agitato.

Ho dovuto quindi accontentarmi dei dati di un paziente che era riuscito a addormentarsi serenamente nonostante queste condizioni. I risultati erano sorprendenti: a differenza di ciò che avviene quando siamo coscienti, l'attività elettrica non si propaga attraverso il cervello. È come se la rete fosse spenta. La marea è salita, tagliando tutti i collegamenti, e ogni attività è ora localizzata in punti precisi. L'implicazione eccitante è che forse la coscienza ha a che fare con la complessa integrazione nel cervello: che, cioè, è un risultato delle porte logiche intercorrelate che controllano quando l'accensione di un determinato insieme di neuroni causa l'attivazione di altri. In particolare, i risultati suggeriscono che la coscienza è collegata al modo in cui la rete manda le informazioni avanti e indietro tra i primi neuroni attivati dalla TMS e il resto del cervello.



Dopo che non ero riuscito a addormentarmi nel laboratorio, Tononi mi ha accompagnato nel suo ufficio, promettendomi che avrebbe rimediato alla mia deprivazione di caffeina con un perfetto espresso preparato con la sua macchina da caffè italiana. Ma c'era anche qualcosa che voleva mostrarmi. Quando ci siamo seduti percependo il meraviglioso aroma del caffè macinato, mi ha passato un foglio su cui c'era scritta una formula matematica.

Ciò ha suscitato subito il mio interesse. Le formule matematiche sono per me l'equivalente del campanello per i cani di Pavlov: se mi mettete davanti una formula matematica, ne verrò subito catturato e vorrò decodificare il suo messaggio. In questo caso, comunque, non ero in grado di riconoscerla.

«È il mio coefficiente di coscienza.»

La coscienza espressa in una formula matematica… e come potrei resistere?

La matematica che crea l'io

Tononi mi ha spiegato che, grazie al suo lavoro su quella sorta di comportamento di rete che corrisponde ai cervelli coscienti, ha sviluppato una nuova teoria delle reti che ritiene siano coscienti. Questa teoria dell'informazione integrata (o IIT) include una formula matematica che misura la quantità di integrazione e di irriducibilità presente in una rete, che secondo Tononi è la chiave per creare un senso dell'io. Questa

misura, chiamata Φ (ossia *phi*, la ventunesima lettera dell'alfabeto greco), può essere applicata sia a macchine come il mio smartphone sia al cervello umano, e offre la prospettiva di un approccio matematico quantitativo a ciò che mi rende me stesso. Stando a Tononi, quanto più è grande il valore di Φ, tanto maggiore è la coscienza della rete. Immagino che sia il matematico in me a essere così eccitato di fronte alla prospettiva di un'equazione in grado di spiegare perché e come sono un io.

Un cervello cosciente sembra simile a una rete dall'alto grado di connettività e feedback: se stimolo i neuroni in una sua parte, il risultato è una cascata di controlli incrociati e passaggi di informazioni attraverso la rete. Se la rete consiste solo di regioni isolate, sembra essere priva di coscienza. Il coefficiente di coscienza di Tononi è quindi una misura di quanto la rete trascende la semplice somma delle sue parti.

Tononi crede però che sia la natura di questa connettività dell'intero a essere importante. Non basta il requisito di un'alta connettività attraverso la rete. Se i neuroni iniziano ad accendersi in modo sincronizzato, ciò non sembra portare a un'esperienza cosciente, trattandosi di fatto di una proprietà del cervello durante il sonno profondo. All'estremo opposto, le crisi che portano una persona a perdere coscienza sono spesso associate all'accensione fortemente sincronizzata dei neuroni da un capo all'altro del cervello. Sembra quindi rilevante che ci sia un'ampia gamma di stati differenziati. Nelle connessioni non ci dovrebbe essere un eccesso di schemi o di simmetria, che potrebbe implicare l'incapacità di differenziare le esperienze diverse. Aumentate troppo le connessioni di una rete, e quest'ultima finirà per comportarsi allo stesso modo qualunque cosa facciate.

Ciò che il coefficiente cerca di catturare è uno degli aspetti straordinari della nostra esperienza cosciente: la capacità del cervello di integrare la vasta gamma di input ricevuti dal nostro corpo e sintetizzarli in una singola esperienza. La coscienza non può essere scissa in esperienze indipendenti provate separatamente. Quando guardo il mio dado rosso da casinò, non ho esperienze separate: una di un cubo privo di colore, e un'altra di una macchia informe di colore rosso. Il

coefficiente, inoltre, cerca di determinare quanta informazione in più viene generata in una rete dal sistema completo rispetto a quando si hanno delle parti disconnesse, come accade al cervello durante il sonno profondo.

Tononi e i suoi colleghi hanno fatto interessanti simulazioni al computer su «cervelli» consistenti in otto neuroni connessi in differenti modi per vedere quale rete ha il valore più alto di Φ. I risultati indicano che la situazione migliore è quella in cui ciascun neurone ha uno schema di connessioni con il resto della rete che si differenzia da quelli degli altri neuroni. Allo stesso tempo, però, è auspicabile che la maggior quantità possibile di informazioni possa essere condivisa attraverso la rete. Così, se consideriamo una qualunque divisione della rete in due metà separate, è meglio che le due metà possano comunicare tra di loro. Questo è un interessante modo di trovare un equilibrio fra l'aumentare le connessioni e ridurre la differenziazione fra i differenti neuroni da un lato, e creare differenziazione a spese della comunicazione dall'altro.

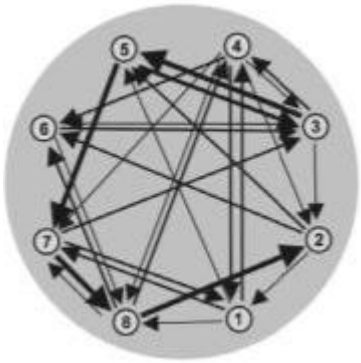
Ma anche la natura della connettività è importante. Tononi ha creato due reti funzionalmente equivalenti e con gli stessi output, ma in un caso il valore di Φ è alto perché nella rete la comunicazione avviene in entrambi i sensi, mentre nell'altro tale valore è basso perché la rete è strutturata in modo che le informazioni vengono trasmesse soltanto in un senso (i neuroni non possono mandare feedback). Tononi ritiene che quest'ultimo sia un esempio di una rete zombie: una rete, cioè, che produce la stessa quantità di informazioni della prima, ma non ha un senso dell'io. Guardando soltanto l'output, non è possibile distinguere fra le due reti, ma il modo in cui la rete zombie genera quell'output ha una qualità del tutto diversa che viene misurata da Φ. Stando al coefficiente Φ di Tononi, la rete zombie è priva di un mondo interno.

È incoraggiante sapere che il sistema talamo-corticale del cervello, che gioca un ruolo importante nel generare la coscienza, ha una struttura simile a quella delle reti con un valore di Φ elevato. Confrontate questa situazione con quella della rete di neuroni nel cervelletto, che non crea una coscienza. Il cosiddetto piccolo cervello è situato nella parte posteriore del cranio e controlla cose come l'equilibrio e la

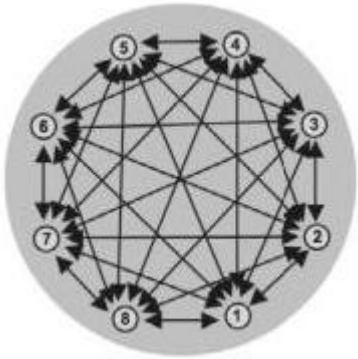
regolazione dei movimenti. Contiene l'80 per cento dei neuroni del cervello; tuttavia, se viene rimosso, anche se la nostra capacità di muoverci risulta gravemente compromessa, il nostro senso di coscienza non subisce alterazioni.

Nel 2014, in Cina una ventiquattrenne venne ricoverata in ospedale con vertigini e nausea. Una scansione del suo cervello fatta per identificarne la causa rivelò che era nata senza cervelletto. Anche se da piccola aveva impiegato un certo tempo per imparare a camminare, e non era mai stata in grado di correre o saltare, nessuno dei medici che l'avevano visitata aveva mai messo in dubbio che fosse del tutto cosciente. Non era uno zombie, ma solo un essere umano fisicamente malfermo.

Se esaminate la rete neurale al cuore del cervelletto, troverete delle aree che tendono ad attivarsi in modo indipendente le une dalle altre, con scarsa interazione, proprio come avviene nel cervello durante il sonno. Il basso valore di Φ della rete del cervelletto è in linea con l'idea per cui esso non crea esperienza cosciente.



Una rete con un elevato valore di Φ e forse un più alto livello di coscienza.



Nonostante l'elevata connettività, la simmetria di questa rete viene a ridurre la differenziazione al suo interno; di conseguenza, l'intero non contribuisce alla creazione di nuove informazioni che non siano già presenti nelle singole parti. Ciò porta a una riduzione del valore di Φ e quindi a un livello di coscienza più basso.

Il fatto che la connettività del cervello possa essere la chiave della coscienza ha condotto all'idea che il mio «connettoma» faccia parte del segreto di ciò che mi rende me stesso. Il connettoma è una mappa completa delle connessioni neurali presenti nel cervello. Come il progetto genoma umano ci ha dato delle informazioni straordinarie sul funzionamento del corpo, la mappatura del connettoma umano potrebbe fornirci intuizioni analoghe sul funzionamento del cervello. Combinando i collegamenti fisici con le regole secondo cui questa rete opera, potremmo avere gli ingredienti per creare la coscienza in una rete.

Il connettoma del cervello umano è ancora un obiettivo remoto, ma abbiamo già un quadro completo dei collegamenti dei neuroni all'interno del *C. elegans*, un verme lungo un millimetro e privo di cervello che ha una nota passione per i mucchi di compost. Il suo sistema nervoso contiene esattamente 302 neuroni, un numero ridotto che è l'ideale per permetterci di creare una mappa completa di tutti i singoli

collegamenti da neurone a neurone. Nonostante questa mappa, però, siamo ancora lontani dal trovare una relazione fra queste connessioni e il comportamento del *C. elegans*.

Internet è cosciente?

Essendo una misura del modo in cui una rete è connessa, il coefficiente Φ di Tononi ci potrebbe aiutare a comprendere se il mio smartphone, Internet o magari anche una città potrebbero acquistare una coscienza. Forse, in un futuro più o meno lontano, Internet o un computer, una volta raggiunta una determinata soglia, potrebbero riconoscersi allo specchio. La coscienza potrebbe corrispondere a una transizione di fase in questo coefficiente, così come l'acqua cambia stato quando la temperatura oltrepassa la soglia di ebollizione o quella di congelamento.

È interessante notare che l'introduzione di un anestetico nel corpo non spegne gradualmente la coscienza ma sembra disattivarla all'improvviso. Se avete mai subito un'operazione e l'anestesista vi ha chiesto di contare fino a venti, saprete (o forse no, non essendovene accorti) che c'è un punto in cui perdete coscienza di colpo. Il cambiamento sembra molto non lineare, come una transizione di fase.

Se la coscienza ha a che fare con la connettività della rete, quali altre reti potrebbero già essere coscienti? Il numero complessivo di transistor connessi via Internet è dell'ordine di 10^{18}, mentre il cervello ha circa 10^{11} neuroni. La differenza sta nel modo in cui sono connessi. Un neurone è in genere collegato a decine di migliaia di altri neuroni, il che consente un maggior grado di integrazione delle informazioni; per contro, i transistor all'interno di un computer non hanno un alto livello di connessioni. Stando alla misura di Tononi, è improbabile che Internet sia cosciente… almeno per ora.

Se scatto una foto con la macchina fotografica digitale integrata nel mio smartphone, la memoria dell'apparecchio può immagazzinare una gamma straordinaria di immagini differenti. Un milione di pixel, per esempio, mi darà $2^{1.000.000}$

diverse possibili immagini in bianco e nero. La macchina registrerà dei dettagli di cui io sono del tutto inconsapevole quando guardo attraverso il mirino. Ma è proprio questo il punto: la mia esperienza cosciente non è in grado di gestire una quantità di input così ingente, e i dati sensoriali grezzi vengono invece integrati per spigolare le informazioni significative dalla scena e limitare il suo contenuto.

A oggi, i computer non sono nemmeno lontanamente in grado di eguagliare il potere della visione umana: non possono raccontarci la storia presente in un'immagine. Il problema è che un computer tende a leggere un'immagine pixel per pixel, e trova difficile integrare le informazioni; gli esseri umani, al contrario, sono bravissimi a prendere questa gigantesca quantità di input visivi e creare una storia partendo dai dati. Questa capacità della mente umana di integrare e raccogliere le informazioni significative sta al cuore della misura della coscienza introdotta da Tononi, il coefficiente Φ.

Certo, non c'è ancora una spiegazione di come o perché un alto valore di Φ dovrebbe produrre la mia esperienza cosciente. Possiamo senza dubbio mettere in correlazione questo valore con la coscienza, il che fa davvero pensare (come testimoniano gli esperimenti sui pazienti addormentati nelle cui reti Φ decresce). Così come le considerazioni sulle differenti aree del cervello che presentano collegamenti distintivi. Tuttavia, non sono ancora in grado di dire perché tutto questo produca la coscienza, o se un computer collegato secondo questi schemi la sperimenterebbe davvero.

Ci sono delle ragioni per cui l'avere un alto valore di Φ potrebbe comportare vantaggi evolutivi significativi. Esso sembra infatti permetterci di pianificare il futuro. Prendendo i dati da differenti sensori, la natura altamente integrata di una rete con un coefficiente Φ elevato può suggerire delle raccomandazioni per le azioni future. Questa capacità di proiettarsi nel futuro, di viaggiare nel tempo con la mente, pare essere uno dei vantaggi evolutivi chiave della coscienza. Una rete con un alto valore di Φ sembra in grado di dimostrare un comportamento simile. Ma perché non potrebbe fare tutto ciò rimanendo non cosciente?

Quando la coscienza usa Skype

Christof Koch, quello del neurone di Jennifer Aniston, è un grande fan del valore Φ come misura della coscienza, e volevo quindi chiedergli se pensasse che questo coefficiente fosse abbastanza solido per fornire una risposta all'«arduo problema», come il filosofo David Chalmers ha definito la sfida di entrare nella testa di un'altra persona.

Dopo il nostro incontro in cima a Mount Baldy, vicino al Caltech, Koch aveva assunto la direzione di una straordinaria impresa, l'Allen Institute for Brain Science, fondato da un singolo individuo, Paul G. Allen (cofondatore della Microsoft) per la ragguardevole somma di 500 milioni di dollari. La motivazione di Allen? Semplicemente, vuole comprendere come funziona il cervello. È scienza aperta, non a scopo di lucro, e i ricercatori mettono tutti i loro dati a disposizione del pubblico. Come afferma Koch, «è davvero un modello affascinante».

Dato che sarebbe stato difficile fare un altro viaggio in California per interrogare Koch riguardo alle sue idee su Φ e la teoria dell'informazione integrata di Tononi, ho deciso che l'alternativa migliore era quella di accedere alla sua coscienza attraverso Skype. Koch voleva però sapere su quale lato dello spartiacque filosofico fossi schierato.

«Certo, possiamo chiacchierare sulla coscienza e su quanto questo problema sia senza risposta. Spero però che non abbia intenzione di demoralizzare i giovani che pensano di dedicarsi alle neuroscienze sottoscrivendo il concetto filosofico dell'"Arduo problema" (arduo con la A maiuscola). I filosofi come Dave Chalmers si occupano di sistemi di credenze e opinioni personali, non di leggi naturali e di fatti; anche se pongono domande interessanti e sollevano stimolanti dilemmi, la storia dimostra che i loro pronostici lasciano alquanto a desiderare.»

Koch ha voluto ricordarmi il filosofo Comte e la sua predizione secondo cui non avremmo mai saputo che cosa c'era nel cuore di una stella. L'ho sempre tenuto presente da quando mi sono imbarcato in questo viaggio nel regno

dell'ignoto. Koch ha anche aggiunto un'altra importante voce al dibattito, quella del suo collaboratore Francis Crick, che nel 1996 aveva scritto: «È molto avventato dire che certe cose sono al di là della portata della scienza».

Koch era eccitato quando abbiamo infine connesso le nostre coscienze attraverso Skype; di fatto, l'ho sempre visto così, per la sua vita all'avanguardia di una delle più grandi sfide scientifiche di oggi. Solo due giorni prima, l'Allen Institute aveva pubblicato dei dati che tentavano di classificare i differenti tipi di cellule nel cervello.

«Una delle cose che non conosciamo è quanti tipi differenti di cellule cerebrali ci sono. Sappiamo da due secoli che il corpo è costituito di cellule, ma ci sono cellule cardiache, cellule epidermiche e cellule cerebrali. Poi però abbiamo capito che non ci sono solo uno o due tipi di cellule cerebrali: ce ne potrebbero essere un migliaio, o addirittura diverse migliaia. Non abbiamo idea di quanti ce ne siano nella corteccia vera e propria.»

L'ultima ricerca di Koch ha prodotto un database che illustra nei dettagli la differente gamma di neuroni corticali che si trovano nel cervello di un topo. «È davvero una cosa affascinante. Ma in questo caso non abbiamo soltanto un bel quadro presentato in una pubblicazione, come in genere avviene nella scienza: sono tutti dati grezzi, e sono tutti scaricabili.» Ramón y Cajal aggiornato al XXI secolo.

Koch ritiene che con questa sorta di analisi scientifica dettagliata del funzionamento del cervello possiamo vincere la sfida di comprendere in che modo esso produce l'esperienza cosciente.

Dato che Koch vuole convincere i giovani scienziati a saltare sul carro dello studio della coscienza, mi chiedevo che cosa lo avesse ispirato a imbarcarsi in un progetto di ricerca quando non c'era ancora nessun carro su cui saltare: all'epoca, infatti, per molti andare alla scoperta della coscienza equivaleva a inoltrarsi nel Sahara alla ricerca dell'acqua.

La sua scelta è stata in parte motivata proprio da quanti ritenevano che fosse un'area inaccessibile. «Una delle ragioni

è stata quella di mostrare a tutte quelle persone che avevano torto. Mi piace provocare.» A Koch piace anche assumersi dei rischi: è questo che lo spinge ad arrampicarsi sul pendio di una montagna e a scalarla da solo fino in cima. Nell'abbracciare questa scelta, però, è entrato in gioco anche un elemento che forse ci sorprenderà un po' di più: il suo desiderio di comprendere la coscienza, infatti, era in parte motivato dalla sua formazione religiosa.

«In ultima analisi, penso che volessi giustificare davanti a me stesso la mia perdurante fede in Dio: volevo mostrare, per mia stessa soddisfazione, che per spiegare la coscienza abbiamo bisogno di qualcosa di più, di qualcosa come la mia idea di un Dio. È però emerso che le cose non stanno così. Comprendere che, in realtà, non c'è nessuna necessità di un'anima mi ha provocato una grande tempesta interiore. Eppure, non ce n'è davvero bisogno per generare la coscienza: si può fare tutto con un meccanismo, una volta che abbiamo qualcosa di speciale come la teoria dell'informazione integrata di Tononi o qualcosa di simile.»

Koch ammette quindi che il suo tentativo di riaffermare la propria fede in qualcosa di trascendente è fallito.

«Nel corso degli ultimi dieci anni, ho perso la fede: ho sempre tentato di integrarla in quel che facevo, ma non mi era più possibile. Sento comunque ancora con forza di vivere in un universo misterioso, favorevole alla vita e alla coscienza. Sembra tutto assai meraviglioso, e ogni giorno mi sveglio con questa sensazione che la vita sia misteriosa e che sia un miracolo. Non ho ancora perso questa sensazione.»

Ma Koch crede che ci stiamo avvicinando alla demistificazione della coscienza, e che la chiave stia proprio nel coefficiente matematico Φ e nell'IIT di Tononi.

«Sono un grande fan di questa teoria dell'informazione integrata, secondo la quale, in linea di principio, dato il diagramma delle connessioni di una persona – o del *C. elegans*, o di un computer – saremo in grado di dire se quel sistema prova qualcosa. In fin dei conti, la coscienza è proprio questo, è esperienza. E saremo anche in grado di dire che cosa quel sistema sta attualmente sperimentando. Ho questo

meccanismo, questo cervello, questo computer che al momento si trovano in questo stato. Questi neuroni sono spenti, questi altri sono accesi; questi transistor si stanno attivando, questi altri no. La teoria afferma che, almeno in via di principio, posso predire l'esperienza di quel sistema, non guardando l'input-output ma scrutando di fatto all'interno del sistema stesso, osservando la matrice della probabilità di transizione e i suoi stati.»

Koch deve affrontare una dura battaglia per convincere gli altri. C'è un gruppo di filosofi e pensatori irriducibili convinti che la scienza non potrà mai risolvere questo problema. Appartengono a una scuola di pensiero che va sotto il nome di misterianismo. Essa ritiene che ci sono misteri insondabili al di là dei limiti della mente umana; e in cima alla lista c'è proprio l'arduo problema della coscienza.

Il nome del movimento – ripreso da una rock band chiamata Question Mark and the Mysterians (Il punto interrogativo e i misteriani) – è nato come una forma di presa in giro ideata dal filosofo Owen Flanagan, che reputava la posizione di questi filosofi estremamente disfattista. Per citare le sue parole: «Il nuovo misterianismo è una posizione postmoderna che mira a piantare un chiodo nel cuore dello scientismo». Koch si è spesso trovato a discutere con filosofi misteriani che considerano fuorviata la sua ricerca di una risposta; così, mi chiedevo che cosa replicasse a chi mette in questione la possibilità stessa di sapere che un sistema stia davvero sperimentando qualcosa.

«Se seguiamo questa linea di pensiero fino alla fine, cadiamo nel solipsismo.»

Nella sua voce si può cogliere l'esasperazione davanti a questa posizione filosofica, per la quale la conoscenza di tutto ciò che va oltre la nostra stessa mente non può mai essere certa. Si tratta di una dottrina che affonda le proprie radici nell'affermazione cartesiana secondo cui l'unica cosa di cui possiamo essere certi è la nostra stessa coscienza.

«Sì… da un punto di vista logico il solipsismo è coerente; tuttavia, è estremamente improbabile che, pur avendo un cervello simile a quello di ogni altra persona, solo io possieda

una coscienza mentre tutti gli altri facciano finta di averla. Potete anche crederci, ma resta il fatto che non è molto probabile.»

Koch pensa forse che chi insiste sull'impossibilità di rispondere all'arduo problema della coscienza dovrebbe, per coerenza, mettere in discussione anche la conoscibilità di ogni altra cosa? Spingersi su posizioni così estreme significa abbracciare inevitabilmente una visione scettica del mondo?

«Esatto, ed è una cosa che non trovo molto interessante. Si può anche aderire a uno scetticismo estremo, ma non è affatto facile. Ogni teoria come l'IIT è, in ultima analisi, una relazione di identità. La tesi di questa particolare teoria e delle altre teorie simili è che l'esperienza si identifica con gli stati in questo stesso spazio iperdimensionale dei qualia, misurato in sostanza dal numero di stati differenti che il vostro sistema può assumere. Equivale a una configurazione, a una costellazione, a un politopo in questo spazio iperdimensionale. L'esperienza è questo. Questo è ciò che prova un altro io, ed è qualcosa che posso predire in via di principio… è un progetto empirico, perché posso dire: "Bene, Marcus, ora stai vedendo qualcosa di rosso, o adesso stai avendo l'esperienza di sentire il profumo di una rosa". Posso usare l'fMRI e vedere che i tuoi neuroni della rosa sono attivati, che la tua area dei colori è attivata. Così, in linea di principio, questo è un progetto totalmente empirico.»

Koch ritiene che questo sia il meglio che possiamo ottenere se vogliamo spiegare la coscienza. Ed è un progetto del tutto in linea con il significato di dedicarsi a una scienza della coscienza. Non basterebbe identificare una configurazione nel cervello che, per esempio, è sempre correlata al nostro riconoscimento di provare una sensazione di dolore, o di rosso, o di felicità? Questo è qualcosa che potrei testare con gli esperimenti. E se ottengo ogni volta una corrispondenza, non potrei dire che so che cos'è l'esperienza del rosso e che, quindi, posso estendere la scienza fino ad affermare che anche un computer, in presenza di quella particolare configurazione, avrà esperienza del rosso?

I misteriani irriducibili obietteranno che, in questo modo, non abbiamo spiegato come una tale rete dia origine a questa sensazione di provare qualcosa. Ma non c'è il rischio di chiedere troppo, al punto da cadere nel solipsismo e quindi di scivolare sempre più giù nello scetticismo, fino ad affermare che in realtà non possiamo dire nulla sull'universo? Oggi sappiamo che la sensazione di calore dipende soltanto dal movimento degli atomi, e nessuno afferma che non abbiamo realmente spiegato perché ciò dia origine al calore. Abbiamo identificato che cos'è il calore. Penso che Koch direbbe lo stesso a proposito della coscienza.

In teoria, l'idea è molto affascinante, ma mi chiedevo se, secondo Koch, potremo mai arrivare al punto di essere in grado di usare uno scanner fMRI (o qualcosa di più sofisticato) per scoprire ciò che qualcuno sta di fatto sperimentando? O sarebbe troppo complesso?

«Questo è un problema di carattere pratico, lo stesso tipo di problema che la termodinamica dovette affrontare nell'Ottocento. Non sarebbe possibile calcolare tutte queste cose. Ma almeno per quanto riguarda una cosa semplice come una creatura con dieci neuroni, le espressioni sono perfettamente ben definite e c'è una risposta univoca. Il numero massimo di neuroni tra cui potremmo districarci è un grosso problema pratico. Riusciremo mai a superarlo? Non lo so, perché il problema cresce esponenzialmente con il numero di neuroni, il che è davvero un guaio. Ma quello è un problema diverso.»

Creare le menti

Il test definitivo della nostra comprensione di ciò che mi rende un io consiste nel verificare se sono in grado di costruire un cervello artificiale dotato di coscienza. Che possibilità ci sono che un'app del mio smartphone arrivi a possedere realmente una coscienza? Gli esseri umani sono già molto bravi a creare cose coscienti: mio figlio è un esempio di come possiamo combinare diverse strutture cellulari, una cellula uovo e un po'

di sperma, che messe insieme hanno tutto il kit e le istruzioni per far crescere un nuovo organismo cosciente. Questo, perlomeno, presupponendo che mio figlio sia cosciente, anche se certe mattine somiglia più a uno zombie.

Sono in corso alcuni ambiziosi progetti per produrre un'analisi delle connessioni di un cervello umano tale da poter essere poi simulata su un computer. Lo Human Brain Project, frutto dell'ingegno di Henry Markram, punta a creare entro una decina d'anni un modello funzionante del cervello umano che possa essere caricato su un supercomputer. «Sarà il bosone di Higgs del cervello, un archivio di Noè della mente» ha dichiarato Markram, che ha ottenuto un finanziamento di un miliardo di euro dalla Commissione europea. Ma una volta terminato il lavoro, queste simulazioni saranno coscienti? Con mia sorpresa, Koch pensa di no.

«Supponiamo che il progetto di Henry Markram abbia successo e che ci ritroviamo con questa perfetta simulazione digitale del cervello umano. Com'è ovvio, sarà anche in grado di parlare, essendo una simulazione perfetta del cervello umano e, come tale, comprende l'area di Broca responsabile del linguaggio. Il computer, comunque, non sarà un'entità cosciente: ci potrà anche essere un grado minimo di Φ al livello di un paio di singoli transistor, ma non sarà mai qualcosa di simile al cervello.»

Il punto è che il coefficiente Φ di Tononi considera la natura del rapporto causa-effetto del meccanismo interno, non il comportamento di input-output. La connettività tipica all'interno del computer prevede che un transistor sulla CPU parli con al massimo altri quattro transistor; ciò determina un valore molto basso di Φ e quindi, nella prospettiva di Koch, un livello di coscienza molto ridotto. La cosa interessante è che, essendo una simulazione perfetta, obietterà a gran voce sostenendo di essere cosciente, di avere un proprio mondo interno; dal punto di vista di Koch, però, le sue saranno soltanto chiacchiere.

«La ragione è in sostanza simile al fatto che, se facciamo girare su un computer la simulazione di un buco nero, la massa simulata non avrà alcun effetto sulla massa reale circostante:

non avremo mai nessuna distorsione dello spazio attorno al computer su cui gira la simulazione. Allo stesso modo, possiamo anche simulare la coscienza su un computer, ma l'entità simulata non proverà nulla. È la differenza tra simulare ed emulare. La coscienza sorge dal repertorio di causa-effetto del meccanismo. È qualcosa di fisico.»

La coscienza dipende da come è strutturata la rete. È una questione simile a quella che emerge con la rete zombie costruita da Tononi con dieci neuroni. La cosa sorprendente è che il principio usato da Tononi per trasformare una rete di dieci neuroni ad alto valore di Φ in una rete zombie (con Φ uguale a zero) dotata dello stesso preciso repertorio di input-output può essere applicato anche alla rete del cervello umano. Entrambe avrebbero lo stesso comportamento di input-output, e tuttavia, data la differenza nelle transizioni interne di stato, una avrà un valore di Φ alto mentre l'altra avrà zero Φ. Ma come potremo mai sapere se ciò significa che una è cosciente e l'altra è uno zombie?

Ciò che mi turba è che questo sembra evidenziare che la soluzione del problema della coscienza è quasi impossibile. Φ è senza dubbio un'ottima misura della differenza tra una simulazione del cervello e l'effettiva natura dell'architettura cerebrale, e viene a definire la differenza tra una rete zombie e la mente umana. Ma come possiamo realmente sapere che la simulazione o la rete zombie non sono coscienti? Quest'ultima continuerà a gridare a gran voce: «Quante volte ve lo devo ripetere? Sono cosciente!», ma Φ replicherà che sta solo fingendo. Io dico allo zombie che Φ afferma che non ha un mondo interno, ma lui ribatte: «Sì che ce l'ho», proprio come farebbe il mio cervello cosciente. E non è questo il cuore del problema? Ho solo input-output per farmi un'idea del sistema che articola queste sensazioni. Posso certo definire Φ come una misura della coscienza ma, in ultima analisi, questa non è l'unica cosa che, per sua stessa natura, trascende la capacità di indagine empirica della scienza?

Scaricare la mia coscienza

Una delle altre ragioni per cui Koch ama Φ come misura della coscienza è che ciò si accorda con la sua convinzione panpsichista secondo cui noi non siamo gli unici esseri dotati di coscienza. Se la coscienza ha a che fare con l'integrazione delle informazioni attraverso una rete, siamo di fronte a un concetto che si può applicare da cose piccole come un'ameba fino alla coscienza dell'intero universo.

«In ultima analisi, ci dice che tutto ciò che ha un potere di causa-effetto su se stesso avrà un certo livello di coscienza. In fin dei conti, la coscienza consiste in quanta differenza facciamo per noi stessi, il potere di causa-effetto che abbiamo su noi stessi. Così, anche un sistema minimo come una cellula – una singola cellula è già incredibilmente complessa – ha un certo potere di causa-effetto su se stesso. Quella cellula proverà pertanto qualcosa: avrà un valore di Φ basso, ma diverso da zero. Il coefficiente potrà anche essere incredibilmente basso, ma ci sarà comunque un certo livello di coscienza. Certo, quella di cui sto parlando è un'intuizione molto antica.»

Quando dico alla gente che sto indagando su quello che non possiamo conoscere, una delle reazioni tipiche è: si occuperà della vita dopo la morte? Si tratta di un problema strettamente legato alla questione della coscienza. Il nostro Φ continua a vivere dopo la nostra dipartita? Non ci sono solide evidenze che qualche parte della nostra coscienza sopravviva dopo la morte. Ma c'è modo di scoprirlo? Dato che è già difficile accedere alle coscienze degli altri in vita, investigare la coscienza di una persona dopo la sua morte sembra un'impresa impossibile. Pare estremamente improbabile, visto il livello di correlazione tra l'attività cerebrale e la coscienza, che qualcosa possa sopravvivere oltre la morte. Se ci potesse essere qualche forma di comunicazione, potremmo avere qualche speranza; è così, in fin dei conti, che siamo in grado di indagare le coscienze che crediamo esistere nelle persone che ci circondano.

Koch è d'accordo con me nel ritenere estremamente improbabile che qualcosa di Φ sopravviva dopo la morte. Di fatto, ha dedicato tempo a discutere di questo problema con un'improbabile interlocutore.

«Un paio di anni fa, ho trascorso una settimana in India a parlare con il Dalai Lama. È stata un'esperienza molto intensa: quattro ore la mattina e quattro il pomeriggio a discutere di scienza. Due intere giornate sono state dedicate alla coscienza. I buddhisti esplorano la loro coscienza dall'interno, grazie alle tecniche della meditazione, da duemila anni; noi, per contro, usiamo l'fMRI, gli elettrodi e la psicofisica dall'esterno, ma in sostanza le nostre vedute tendono a concordare. Il Dalai Lama si è mostrato molto vicino a numerose idee scientifiche, concordavamo su molte cose: per esempio, non ha nessun problema di fronte all'idea di evoluzione.»

Ma ci saranno anche stati dei punti di differenza, no?

«L'unica cosa su cui eravamo fondamentalmente in disaccordo era l'idea della reincarnazione. Non riesco a capire come potrebbe funzionare. Dovrei avere un meccanismo in grado di trasportare la mia coscienza o i miei ricordi nella vita successiva. A meno di trovare qualcosa nella fisica quantistica (e io non la conosco abbastanza per saperlo), non vedo nulla che possa permetterci di affermare l'esistenza di un meccanismo del genere.»

Come sottolinea Koch, per tentare di rispondere a questo problema da un punto di vista scientifico, ci serve una spiegazione di come la coscienza possa conservarsi dopo la morte del corpo. A questo riguardo, sono state avanzate alcune proposte interessanti. Per esempio, se la coscienza, in ultima analisi, corrisponde agli schemi delle informazioni nel cervello (forse qualcosa di vicino a ciò che sostiene Tononi), qualcuno sostiene che, in linea teorica, le informazioni possono sempre essere ricostruite. Un paradosso dei buchi neri riguarda la questione se l'informazione vada perduta quando le cose scompaiono all'interno di questi forni crematori cosmici; ma ammesso di evitare i buchi neri, la combinazione di determinismo quantistico e reversibilità implica che nessuna informazione viene mai perduta.

Il fisico religioso John Polkinghorne ricorre al seguente argomento per spiegare la possibilità della vita dopo la morte: «Anche se questo schema si dissolve con la morte, sembra del tutto razionale credere che esso verrà ricordato da Dio e

ricostituito con un atto divino di resurrezione». Certo, forse non è neppure necessario ricorrere a Dio per comprendere questa sorprendente idea. Alcune persone stanno già tentando di assicurarsi che le informazioni contenute nel loro cervello vengano immagazzinate da qualche parte prima che il loro hardware cessi di funzionare. L'idea di scaricare la mia coscienza nel mio smartphone in modo che quest'ultimo diventi me potrebbe non essere poi troppo lontana dall'ipotesi di Polkinghorne; solo che, in questo caso, sarebbe la Apple a fare la parte di Dio. L'estasi dei nerd, come lo chiama Koch.

Zombieland

Quando siamo di fronte a una domanda a cui non possiamo rispondere, dobbiamo fare una scelta. Forse sul piano intellettuale la risposta corretta è rimanere agnostici: in fin dei conti, è proprio questo il significato di aver identificato una domanda senza risposte. D'altro canto, però, la fede in una risposta, in un senso oppure nell'altro, avrà un impatto su come conduciamo le nostre vite. Immaginate di considerarvi unici e di ritenere che tutte le altre persone siano degli zombie: ciò avrebbe senz'altro un grosso effetto sulle vostre interazioni con il mondo. O, per contro, se a un certo momento vi convincete che il vostro computer abbia una coscienza, la pressione del suo pulsante di spegnimento si carica di risvolti morali.

Qualcuno sostiene che per risolvere il problema della coscienza dovremo introdurre nella nostra descrizione dell'universo un nuovo ingrediente di base che le dà origine e che – come il tempo, lo spazio o la gravità – non può essere ridotto a qualcos'altro. Tutto quello che possiamo fare è esplorare il rapporto fra questo nuovo ingrediente e gli altri che già conosciamo. A me questa sembra però una scappatoia. La coscienza emerge da un cervello in sviluppo quando viene raggiunta una qualche soglia critica, come il momento in cui l'acqua inizia a bollire e passa allo stato gassoso. In natura ci sono molti esempi di tali punti critici dove avviene una transizione di fase. La domanda è se la transizione di fase

viene a creare qualcosa che non può essere spiegato se non introducendo una nuova entità fondamentale. Non è che non ci siano precedenti in tal senso, certo. Le onde elettromagnetiche sono create come una conseguenza dell'accelerazione di particelle cariche; non si tratta di un fenomeno emergente, ma di un nuovo ingrediente fondamentale del mondo naturale.

O, magari, la coscienza è associata a un altro stato della materia, come quello solido o quello liquido. Questo stato della materia ha già ricevuto un nome: il perceptronium, che è definito come la sostanza più generale che avverte soggettivamente una consapevolezza di sé. Questo cambiamento di stato sarebbe in linea con la visione della coscienza come un fenomeno emergente. Oppure, potrebbe esserci un campo di coscienza attivato quando la materia raggiunge taluni stati critici, allo stesso modo in cui il campo di Higgs dà massa alla materia? Sembra un'idea folle, ma forse, per affrontare un concetto così sfuggente, è proprio quello che ci serve.

Secondo alcuni nulla di fisico potrà mai rispondere al problema di che cosa si prova a essere un io, e l'esistenza stessa della coscienza implica qualcosa che trascende il nostro regno fisico. Tuttavia, se la mente può muovere la materia, deve senz'altro esserci una fisica che connette questi due regni, permettendo quindi alla scienza di rientrare in gioco.

Magari, però, il problema della coscienza non è affatto scientifico, e riguarda il linguaggio. Questa è la posizione di una scuola filosofica che risale a Wittgenstein. Nelle sue *Ricerche filosofiche*, Wittgenstein esplora il problema di un linguaggio privato. Il processo di apprendimento del significato della parola «tavolo» richiede che qualcuno indichi un tavolo e dica «questo è un tavolo»; se io indico qualcosa che non corrisponde a ciò che la società intende per «tavolo», vengo corretto. Wittgenstein contesta che questo stesso principio possa essere applicato con la parola «dolore». Il dolore non è un oggetto a noi esterno, qualcosa che possiamo indicare col dito e chiamare «dolore». Magari potremo anche trovare una costante correlazione tra i responsi di una scansione fMRI e le mie sensazioni di dolore; ma quando

indichiamo lo schermo e diciamo che quello è dolore, è davvero ciò che intendiamo con questo termine?

Wittgenstein credeva che il problema di esplorare i mondi privati dei nostri qualia e delle nostre sensazioni fosse un problema di linguaggio. Come possiamo condividere il significato di «ho un dolore qui»? È impossibile. La frase «ho un dolore a un dente» sembra avere la stessa qualità di «ho un tavolo», il che ci fa venire la tentazione di assumere che esprimano entrambe lo stesso tipo di cosa; assumiamo che ci sia qualcosa chiamato «il mio dolore» nello stesso senso in cui c'è «un tavolo». Questa espressione sembra dire qualcosa, ma Wittgenstein riteneva che in realtà non dicesse assolutamente nulla: «La confusione che ci investe sorge quando il linguaggio è come un motore che gira a vuoto, non quando sta lavorando».

Per esempio, se provate una sensazione e dichiarate: «Penso che questo sia dolore», io non ho modo di correggervi: non ho nessun criterio in base al qualei determinare se ciò che state provando sia quello che io intendo con «dolore». Wittgenstein si chiede se sia possibile mostrarvi il dolore pizzicandovi un dito e dichiarando «il dolore è questo». Se a questo punto voi replicate dicendo, per esempio: «Oh, ma io so che cosa significa "dolore"; quello che non so è se *questa cosa*, che provo ora, sia dolore», Wittgenstein risponde che «dovremmo limitarci a scuotere la testa ed essere costretti a considerare le (vostre) parole come una bizzarra reazione di cui non sappiamo che cosa farci».

Per inquadrare il problema di identificare che cosa succede nelle nostre teste, possiamo immaginare che ciascuno di noi abbia una scatola contenente qualcosa. Diciamo tutti che l'oggetto all'interno è «uno scarabeo», ma l'unica scatola in cui possiamo guardare è la nostra: pertanto, è perfettamente possibile che ognuno di noi abbia qualcosa di diverso dentro alla propria scatola, o che la cosa all'interno continui a cambiare, o anche che nella scatola non ci sia nulla. Ciononostante, chiamiamo tutti questo oggetto «uno scarabeo». Per chi ha una scatola vuota, però, la parola «scarabeo» è un nome che non designa nulla; di fatto, non è neppure un nome. Questa parola, quindi, ha un qualche

significato? I nostri cervelli sono come la scatola e la coscienza corrisponde allo scarabeo? Uno scanner fMRI ci permette infine di guardare all'interno della scatola di un altro e vedere se il suo scarabeo è uguale al mio? Questa macchina può salvare la coscienza dai giochi linguistici di Wittgenstein?

Wittgenstein riflette su come una frase, o una domanda, ci può ingannare portandoci a credere che significhi qualcosa soltanto perché ha esattamente la stessa forma di una frase reale; esaminandola con attenzione, però, ci accorgiamo che di fatto non si riferisce a nulla. Questo, secondo molti filosofi, è il cuore della questione della coscienza: non è un problema scientifico, ma una sfida che svanirà come tale non appena ci renderemo conto che si tratta soltanto di una confusione linguistica.

Daniel Dennett è uno dei filosofi che seguono le orme di Wittgenstein. Ritiene che, negli anni a venire, capiremo che ha poco senso spingere questo lungo dibattito sull'idea di coscienza oltre quelle cose fisiche che paiono requisiti necessari per la nostra consapevolezza. Così, per esempio, se incontriamo una macchina o un organismo che funziona esattamente come ci aspetteremmo da un essere cosciente, dovremmo limitarci a definire quella cosa come cosciente. Il problema se sia uno zombie oppure no – se di fatto provi qualcosa o meno – andrebbe semplicemente ignorato. Se non c'è modo di distinguere lo zombie senza coscienza dall'essere umano cosciente, qual è il senso di avere una parola per descrivere tale differenza? Solo quando possiamo sapere che c'è una differenza ha senso avere una parola che la descriva.

A sostegno della propria posizione, Dennett cita il caso del vitalismo, che è andato incontro a un destino simile: abbiamo abbandonato l'idea che ci fosse un qualche ingrediente speciale in più, un *élan vital*, uno slancio vitale che soffiava la vita in questi insiemi di cellule. Se mi mostrate un insieme di cellule che hanno la capacità di replicarsi, che miagolano e fanno le fusa come un gatto, e poi dichiarate che di fatto non è vivente, vi sarà molto difficile convincermi. Alcuni ritengono che le discussioni sulla coscienza finiranno allo stesso modo di quelle sul vitalismo. Quest'ultimo era un tentativo di spiegare come un sistema fisico potesse svolgere le attività associate a

un organismo vivente: riprodursi, autorganizzarsi, adattarsi. Una volta trovata la spiegazione di quei meccanismi, il problema della vita è stato risolto e non c'è stato più bisogno di un *élan vital*. Nel caso della coscienza, però, per alcuni la questione di come la materia fisica produca un'esperienza soggettiva non può essere risolta in questo stesso modo, attraverso una spiegazione dei meccanismi, e questo proprio a causa della sua stessa natura soggettiva.

Con l'avvento di nuove straordinarie tecniche e attrezzature, il nostro mondo interno è diventato meno opaco. Le attività mentali sono private, ma le interazioni fisiche con il mondo sono pubbliche. In che misura posso avere accesso al dominio privato analizzando quello pubblico? Probabilmente, possiamo arrivare al punto in cui io sono in grado di sapere che state pensando a Jennifer Aniston o al teorema di Pitagora semplicemente guardando i neuroni che si accendono.

Ma anche per cogliere quello che effettivamente provate, per mettermi nei vostri panni, basta osservare l'accensione dei neuroni? Sarò mai in grado di distinguere l'entità cosciente dallo zombie? Il mio intestino ha 100 milioni di neuroni, lo 0,1% di quelli presenti nel mio cervello, eppure non è cosciente. O magari sì? Se di fatto avesse una coscienza distinta dalla mia, come potrei saperlo? Questo è il cuore del problema della coscienza. Il mio stomaco potrebbe anche iniziare a comunicare con me, ma come potrei mai sapere se percepisce il rosso o si innamora allo stesso mio modo? Potrei fare una scansione, sondarlo con gli elettrodi, scoprire che le sue connessioni neurali e gli schemi di attivazione dei suoi neuroni non sono da meno di quelli del cervello di un gatto (che ha altrettanti neuroni), ma possiamo spingerci soltanto fino a lì?

La questione di come distinguere gli zombie dalle entità coscienti potrebbe rimanere uno dei problemi insoluti della scienza. Il test di Turing a cui ho sottoposto il mio smartphone all'inizio del nostro viaggio nella mente ci fa intuire la sfida che ci attende. Era il chatterbot zombie a voler diventare un poeta, oppure voleva diventare ricco? È un chatterbot abbastanza intelligente da fare un gioco di parole sull'affermazione di Cartesio «Penso, dunque sono»? Finirà

per uscire con qualcuno/a? Chi è lo zombie e chi l'entità cosciente?

Alla fine della nostra chiacchierata su Skype, Koch ha ammesso che non ci sono garanzie che troveremo mai una risposta.

«Non c'è nessuna legge nell'universo che dica che abbiamo la capacità cognitiva di spiegare tutto. Se fossimo cani – intendiamoci, io amo il mio cane – il mio cane è del tutto cosciente, ma non capisce le tasse, non capisce la relatività speciale o neanche le più semplici equazioni differenziali. In verità, anche la maggior parte delle persone non capisce le equazioni differenziali. Ma per questa stessa ragione, odio quando la gente ti dice che non lo sapremo mai. È una cosa che non possiamo dire. È vero, non ci sono garanzie. Ma è proprio un atteggiamento disfattista, giusto? Voglio dire, Marcus, che sorta di programma di ricerca è quello dove alzi le mani e dici: "Scordiamocelo, non potremo mai capirlo, non ci sono speranze"? Questo è disfattismo.»

Con questo appello a non smettere di cercare di rispondere ai problemi senza risposta che mi risuonava ancora nelle orecchie, ho chiuso la nostra chiamata attraverso Skype. Il volto di Koch è svanito dal mio schermo, lasciandomi con una leggera sensazione di disagio: ero proprio sicuro che all'altro capo della linea ci fosse stato davvero Koch? Non è che magari aveva messo a punto un qualche avatar, generato da algoritmi, per far fronte all'assalto di domande che riceve sulla questione se potremo mai risolvere l'arduo problema della coscienza?

Settimo Confine: il cracker natalizio

13

«Il numero è la misura delle forme e delle idee e la causa degli dèi e dei demoni.»

PITAGORA

L’asserzione sull’altra faccia di questa carta è falsa

L’asserzione sull’altra faccia di questa carta è vera

Stanco della solita gamma di cracker natalizi[1] venduti nei negozi, quest’anno ho deciso di preparare per la mia famiglia i miei speciali cracker matematici fatti in casa. Ognuno includeva una barzelletta matematica e un paradosso. Per quanto riguarda le prime, i miei erano dell’opinione che fossero molto più matematiche che non barzellette. Decidete da soli: «Quanti matematici ci vogliono per cambiare una lampadina? 0,9999 periodico». Se non state ridendo, non preoccupatevi; non l’ha fatto neanche la mia famiglia. Se non l’avete capita, il punto è – anche se non bisognerebbe mai spiegare una barzelletta – che si può dimostrare che 0,9999 periodico coincide di fatto col numero 1.

I paradossi erano un pochino meglio. Uno conteneva un nastro di Möbius, un oggetto geometrico in apparenza paradossale che ha un’unica faccia. Se prendete una lunga striscia di carta e le applicate un mezzo giro di torsione prima di incollare insieme le due estremità, la figura che ne risulta ha una faccia sola. Per accertarvene, potete tentare di colorare le facce: iniziate a colorarne una, e presto vi ritrovate ad aver coperto l’intera superficie. Il nastro di Möbius ha poi una proprietà sorprendente: se lo tagliate a metà parallelamente al bordo, non si divide in due anelli separati ma rimane integro, come un singolo anello ma con due mezzi giri di torsione.

Il cracker capitato a me non era troppo male, anche se a dirlo sono io che l'ho preparato. Anche la barzelletta era piuttosto divertente: «Per che cosa sta la "B" in Benoit B. Mandelbrot? Benoit B. Mandelbrot». (Se ancora non state ridendo, forse vi sfugge che Mandelbrot è lo scopritore dei frattali di cui abbiamo parlato nel Primo Confine, quelle forme geometriche che, a qualunque livello di ingrandimento, non diventano mai più semplici.) Il paradosso, poi, era uno dei miei preferiti in assoluto e consisteva delle due asserzioni riportate all'inizio del capitolo, una su ciascun lato di un cartoncino. Sono sempre stato affascinato – e, in egual misura, turbato – dai giochi di parole di questo tipo: da bambino, uno dei miei libri preferiti era intitolato *Qual è il titolo di questo libro?* ed era pieno di assurdi giochi di parole che spesso sfruttavano, come il titolo, le implicazioni dell'autoreferenzialità.

Ho imparato a non sorprendermi davanti alle frasi formate nel linguaggio naturale che danno origine a paradossi come quello catturato dalla logica circolare delle due asserzioni sul cartoncino del mio cracker: il semplice fatto che possiamo formare frasi dotate di significato non garantisce infatti di assegnare loro valori di verità sensati.

Penso che la natura sfuggente del linguaggio sia una delle ragioni che mi hanno spinto verso le certezze della matematica, dove questa sorta di ambiguità non è tollerata. Come spiegherò in questo confine, però, uno dei più grandi logici matematici di tutti i tempi, Kurt Gödel, si è servito del paradosso del mio cracker per dimostrare che anche la mia stessa disciplina contiene affermazioni sui numeri vere a prescindere dal fatto che noi possiamo mai dimostrarle.

Scienza versus matematica

Il desiderio di certezza, di sapere davvero, è stata una delle ragioni principali per cui ho scelto la matematica rispetto alle altre scienze. Nelle scienze, le cose che pensiamo di sapere sull'universo sono modelli che corrispondono ai dati. Perché

una teoria possa considerarsi scientifica, questi modelli devono essere falsificabili, ossia dev'essere possibile dimostrare che, eventualmente, sono sbagliati. Il motivo per cui sopravvivono – se sopravvivono – è che tutti i dati empirici confermano il modello; se e quando scopriamo nuovi dati che lo contraddicono, dobbiamo cambiarlo. Per sua stessa natura, una teoria scientifica può essere scartata. Stando così le cose, potremo mai sapere davvero se siamo nel giusto?

Un tempo pensavamo che l'universo fosse statico, ma poi le nuove scoperte ci hanno rivelato che le galassie si stanno allontanando da noi. Credevamo che l'espansione dell'universo stesse rallentando per via del freno rappresentato dall'attrazione gravitazionale, salvo poi scoprire che sta di fatto accelerando. Abbiamo elaborato un modello di questa espansione accelerata introducendo l'idea che ad alimentarla sia l'energia oscura; questo modello attende ancora di essere falsificato, benché per ora i dati raccolti continuino a corroborarlo. Alla fine, è del tutto possibile che arriveremo al modello corretto dell'universo, che non verrà più smentito da ulteriori rivelazioni; tuttavia, anche in quel caso non potremo mai essere sicuri di essere arrivati alla risposta giusta.

Questo è uno degli aspetti eccitanti della scienza: che si evolve continuamente, ci sono sempre nuove spiegazioni. Possiamo provare un certo dispiacere per le vecchie teorie diventate irrilevanti. Certo, le nuove teorie si sviluppano a partire da quelle vecchie. Uno scienziato vive con la paura che la sua teoria possa essere soltanto la moda del momento, che possa vincere premi su premi per poi ritrovarsi all'improvviso sorpassata. I modelli dell'atomo come un pudding natalizio, l'idea di un tempo assoluto, la convinzione che le particelle avessero una posizione e una quantità di moto identificabili: tutte queste teorie non sono più in cima alla lista dei bestseller della scienza, ma sono state sbaragliate da nuove spiegazioni.

Il modello dell'universo che leggevo sui libri di scuola è stato totalmente riscritto. Lo stesso non si può dire, però, dei teoremi che ho appreso su quei banchi: sono veri oggi come quando li ho incontrati per la prima volta, e come quando sono stati scoperti (in alcuni casi, anche oltre duemila anni fa). Nelle mie vesti di adolescente insicuro e brufoloso, ero

davvero attratto dalla certezza promessa da questa disciplina. Ciò non significa che la matematica sia statica: essa continua infatti a crescere man mano che gli ignoti diventano noti, ma con la differenza che questi noti restano tali, continuano a godere di buona salute e diventano le prime pagine nei passi avanti successivi. Perché il processo di acquisizione della verità matematica è così diverso da quello con cui devono fare i conti gli scienziati, che non possono mai sapere con certezza se sono giunti alla verità?

L'ingrediente più importante nell'armamentario del matematico è la dimostrazione.

La dimostrazione: la strada per la verità

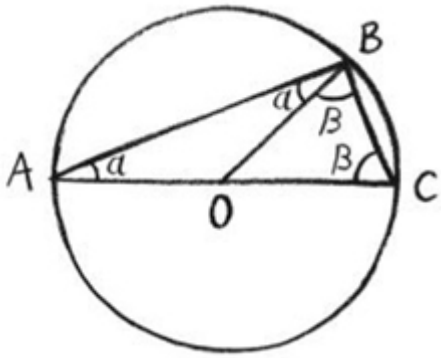
Sappiamo che c'erano persone che facevano matematica già nel II millennio a.C.: tavolette di creta babilonesi e papiri egiziani mostrano sofisticati calcoli e soluzioni di enigmi, stime del valore di π, la formula per il volume di una piramide e algoritmi applicati alla soluzione di un'equazione quadratica. In generale, però, questi documenti illustrano procedure applicabili a particolari problemi per ottenere delle soluzioni: non troviamo una giustificazione del motivo per cui queste procedure dovrebbero funzionare sempre, al di là della convincente evidenza che hanno funzionato nelle migliaia di esempi documentati fino a quel momento nelle tavolette di creta. La conoscenza matematica si basava sull'esperienza e aveva un gusto più scientifico; se saltava fuori un nuovo problema che esulava dal corrente algoritmo, le procedure venivano adattate.

Le cose cominciarono a cambiare verso il V secolo a.C., quando gli antichi greci affondarono i denti in questa disciplina. Gli algoritmi iniziarono a essere accompagnati da argomenti che giustificavano la ragione per cui avrebbero fatto sempre ciò che era riportato sulla tavoletta. Non bastava dire che la procedura aveva funzionato nelle ultime mille volte e che quindi avrebbe probabilmente funzionato anche la

successiva: l'argomento chiariva perché la proposta avrebbe funzionato sempre. Era nata così l'idea di dimostrazione.

Talete di Mileto è considerato il primo autore accertato di una dimostrazione matematica. Nella fattispecie, ha dimostrato che se prendiamo un punto qualsiasi sulla circonferenza di un cerchio e lo uniamo alle due estremità di una diagonale del cerchio stesso, l'angolo da noi creato è un angolo retto. Non importa quale cerchio o quale punto scegliamo: l'angolo sarà sempre retto. Non è un'approssimazione, e non è così solo perché sembra funzionare in tutti gli esempi che abbiamo tracciato, ma perché è una conseguenza delle proprietà dei cerchi e delle linee.

La dimostrazione di Talete, attraverso una brillante serie di passaggi logici, accompagna il lettore dalle cose della cui verità è già certo a una nuova conoscenza che non appare necessariamente evidente non appena guardiamo un cerchio. Il trucco sta nel tracciare una terza linea che va dal punto iniziale sul cerchio, B, al centro del cerchio in O.



Perché questa terza linea ci è d'aiuto? Perché ora abbiamo due triangoli con due lati di eguale lunghezza. Ciò significa che, in entrambi i triangoli, i due angoli opposti al centro del cerchio sono congruenti; questa proprietà è già stata dimostrata per tali triangoli. Prendiamo in considerazione il più grande, quello che abbiamo disegnato all'inizio: i suoi angoli corrispondono alla somma $2\alpha + 2\beta$. Combiniamo quindi questo risultato con la conoscenza del fatto che in un triangolo la somma degli angoli interni è pari a 180 gradi, e potremo concludere che la somma $\alpha + \beta$ deve misurare 90 gradi, come asserito da Talete.

Da bambino, quando ho visto per la prima volta questa dimostrazione, mi sono davvero entusiasmato. Potevo cogliere

già dai disegni che l'angolo sulla circonferenza sembrava un angolo retto, ma come facevo a esserne certo? La mia mente cercava una ragione per cui le cose dovevano stare necessariamente così. Quindi, ho voltato pagina e ho visto la terza linea tracciata da Talete fino al centro del cerchio, e ho intuito le implicazioni logiche che ne seguivano. All'improvviso, ho capito con assoluta chiarezza perché quell'angolo doveva misurare 90 gradi.

Va notato che già in questa dimostrazione potete vedere come l'edificio matematico viene costruito sopra cose già dimostrate, cose come il fatto che la somma degli angoli interni di un triangolo è pari a 180 gradi. E la scoperta di Talete, a sua volta, diventa un nuovo mattone con cui costruire lo strato successivo.

La dimostrazione di Talete è una delle tante che compaiono negli *Elementi* di Euclide, il libro che molti considerano il modello di riferimento per la matematica e la dimostrazione. Parte da alcuni elementi costitutivi fondamentali, gli assiomi, asserzioni di geometria che sembrano così palesemente evidenti da poter essere accettate come le fondamenta sicure su cui iniziare a costruire gli argomenti logici.

L'idea di dimostrazione non emerse dal nulla come il frutto dell'ingegno di un singolo individuo isolato, ma comparve insieme a un nuovo stile di scrittura sviluppatosi nell'antica Grecia. L'arte della retorica, formulata da filosofi come Aristotele, rappresentava una nuova forma di discorso mirato a convincere il pubblico: che si trattasse di una disputa legale, di un confronto politico o, semplicemente, della narrazione di una storia, il pubblico veniva condotto in un viaggio logico in cui l'oratore tentava di convincerlo delle proprie posizioni. La matematica egiziana e babilonese era nata dalle esigenze legate alla costruzione e alla misurazione delle nuove città che crescevano attorno all'Eufrate e al Nilo; questo nuovo bisogno di argomenti logici e retorici, invece, nacque dalle istituzioni politiche delle fiorenti città-Stato al cuore dell'impero greco.

Per Aristotele, la retorica consisteva in una combinazione di pura logica e metodi pensati per far leva sulle emozioni del pubblico. La dimostrazione matematica attinge al primo di

questi due elementi, ma ha anche a che fare con la narrazione delle storie; ed è questo il motivo per cui lo sviluppo della dimostrazione in questa precisa epoca e in questo preciso posto fu probabilmente legato tanto alle sofisticate narrazioni costruite dai drammaturghi come Sofocle ed Euripide quanto ai dialoghi filosofici di Aristotele e Platone.

A loro volta, le esplorazioni matematiche dei greci si spinsero oltre gli algoritmi finalizzati alla costruzione degli edifici e ai rilevamenti topografici per procedere verso sorprendenti scoperte che assomigliavano a storie matematiche per eccitare un lettore.

Una dimostrazione è una narrazione logica che accompagna il lettore da un posto che gli è noto a una nuova destinazione dove non è mai stato prima. Come le avventure di Frodo nel *Signore degli anelli* di Tolkien, una dimostrazione è una descrizione del viaggio dalla Contea a Mordor. All'interno dei familiari confini della Contea ci sono gli assiomi della matematica, le verità di per sé evidenti sui numeri, insieme alle proposizioni già dimostrate. È da qui che parte la ricerca. Il viaggio da questo territorio deve obbedire alle regole della deduzione matematica – come le mosse legittime di un pezzo degli scacchi – che stabiliscono i passi che possiamo fare attraverso questo mondo. A volte capita di arrivare a quello che sembra un vicolo cieco, e occorre fare un passo laterale o magari anche tornare indietro per cercare un modo per aggirare l'ostacolo. Talvolta, per poter continuare il viaggio bisogna aspettare la creazione di nuovi personaggi matematici, come i numeri immaginari o il calcolo infinitesimale. La dimostrazione è la storia del viaggio e la mappa che ne segna le coordinate. Il registro di bordo del matematico.

Per guadagnarsi un posto nel canone matematico, al viaggio non basta produrre un'affermazione vera sui numeri o la geometria: deve sorprendere, deliziare, toccare il lettore. Dovrebbe contenere drammi e pericoli. La matematica non è una semplice raccolta di affermazioni vere sui numeri, così come la letteratura non è l'insieme di tutte le possibili combinazioni di parole e la musica di tutte le possibili combinazioni di note. La matematica richiede giudizio estetico e scelta, ed è probabile che sia proprio questo il motivo per cui

l'arte della dimostrazione matematica è nata in un periodo in cui la narrazione delle storie era un'attività fiorente. La dimostrazione non è in debito solo con il logos della retorica di Aristotele, ma anche – e, probabilmente, in egual misura – con il suo pathos.

Numeri oltre i confini

Per quanto molte delle prime dimostrazioni geometriche siano costruttive, gli antichi greci usarono i loro nuovi strumenti matematici anche per dimostrare che determinate cose sono impossibili, assurde. Un esempio, come abbiamo già visto, è dato dalla scoperta che la radice quadrata di 2 non può essere scritta sotto forma di frazione.

Anche questa dimostrazione ha un carattere molto narrativo: il lettore viene accompagnato in un viaggio fatto sulla base dell'assunzione che la lunghezza della diagonale di un quadrato unitario possa essere scritta come una frazione. Con il procedere della storia, il lettore viene risucchiato sempre di più in un ginepraio fino a giungere a una conclusione del tutto assurda: che, cioè, i numeri dispari sono pari e viceversa. La morale del racconto è che l'ipotetica frazione che avrebbe dovuto rappresentare questa lunghezza dev'essere soltanto un'illusione. (Per chi vuole fare un giro in questo ginepraio, la storia è riportata nel riquadro seguente.)

▶ *Dimostrazione dell'irrazionalità della radice quadrata di 2*

Sia L la lunghezza dell'ipotenusa di un triangolo rettangolo i cui lati minori misurano entrambi 1. Il teorema di Pitagora ci dice che il quadrato costruito sull'ipotenusa avrà un'area pari alla somma di quelle dei quadrati costruiti sui cateti. Ora, ciascuno dei due quadrati più piccoli ha un'area pari a 1, mentre l'area di quello più grande è L^2; pertanto, L è un numero che elevato al quadrato dà 2.

Supponiamo adesso che L sia uguale a una frazione: $L = p/q$.

Possiamo assumere che almeno uno dei due numeri p e q sia dispari; se sono entrambi pari, infatti, possiamo continuare a dividere numeratore e denominatore per 2 finché uno di essi non diventa dispari.

Dato che $L^2 = 2$, avremo che $p^2/q^2 = 2$.

Moltiplichiamo ora entrambi i lati dell'equazione per q^2, e avremo: $p^2 = 2 \times q^2$.

Così, p è dispari o pari? Sappiamo che p^2 è pari, quindi p dev'essere a sua volta pari perché, se fosse dispari, anche il suo quadrato dovrebbe essere dispari: dispari per dispari dà infatti dispari. Quindi, $p = 2 \times n$ per un certo numero n. Ora, dato che p è pari, ciò significa che q dev'essere il numero dispari. Ma un momento…

$2 \times q^2 = p^2 = (2 \times n)^2 = 2 \times 2 \times n^2$,

quindi possiamo dividere entrambi i lati dell'equazione per 2, ottenendo

$q^2 = 2 \times n^2$.

Come ricorderete, avevamo stabilito che q doveva essere il numero dispari.

Pertanto, anche q^2 sarà dispari. Tuttavia, il lato destro di questa equazione è un numero pari! Così, se L fosse esprimibile sotto forma di frazione, avremmo che dispari = pari; ma ciò è chiaramente assurdo, e quindi la nostra assunzione iniziale secondo cui L può essere scritta come una frazione dev'essere falsa.

Penso che questa sia una delle dimostrazioni matematiche più sbalorditive: grazie a un argomento logico costituito da un numero finito di passi, abbiamo dimostrato che c'è una lunghezza per esprimere la quale occorre l'infinito. ◀

A chi lo incontrava per la prima volta, un numero come la radice quadrata di 2 sarà sembrato qualcosa che, per sua stessa natura, non poteva essere conosciuto pienamente. Conoscere un numero significava infatti scriverlo, esprimerlo in termini di altri numeri già noti; ogni tentativo di registrare il valore della radice quadrata di 2, però, sembrava destinato al fallimento.

Fu un momento straordinario nella storia della matematica: la creazione di un tipo di numeri davvero nuovo. I matematici avrebbero potuto dire che l'equazione $x^2 = 2$ non aveva nessuna soluzione; i numeri noti all'epoca, infatti, non permettevano di risolverla con precisione (di fatto, fu solo nell'Ottocento che venne sviluppata una matematica abbastanza sofisticata da dare un senso a tale numero). Tuttavia, c'era la sensazione che quel numero esistesse: era possibile vederlo lì, come la lunghezza del lato di un triangolo. Alla fine, fecero l'audace passo di aggiungere al nostro armamentario matematico un nuovo tipo di numeri che ci permettessero di risolvere tali equazioni.

Ci sono state anche altre equazioni apparentemente insolubili la cui risposta, a differenza della radice quadrata di 2, non era neppure visibile; tuttavia, anche in questi casi siamo riusciti a creare delle soluzioni. Dal nostro punto di vista moderno, risolvere l'equazione $x + 3 = 1$ sembra facile: $x = -2$.

I greci, però, non avevano nessun numero che permettesse di risolverla. Diofanto si riferì a questo tipo di equazione definendola assurda. Per i matematici come lui, i numeri erano geometrici: erano cose reali dotate di esistenza, lunghezze di linee, e non c'era nessuna linea tale che, estesa di tre unità, sarebbe venuta ad avere una lunghezza pari a una unità.

Per altre culture, invece, un'equazione del genere non rappresentava una sfida impossibile. Nell'antica Cina, i numeri servivano a contare il denaro, e quest'ultimo si presentava spesso nella forma negativa dei debiti. Non c'era quindi nulla di assurdo in una situazione in cui, aggiungendo tre monete ai suoi fondi, una persona si ritrovava a possedere soltanto una moneta; le altre due, per esempio, potevano servirgli per saldare un debito con un amico. Nel 200 a.C., i matematici cinesi raffiguravano i loro numeri usando dei bastoncini rossi; se però i numeri rappresentavano dei debiti, ricorrevano a dei bastoncini neri. Questa è l'origine dell'espressione «andare in rosso», anche se nel corso dei secoli i colori originari sono stati invertiti.

Furono comunque gli indiani, nel VII secolo d.C., a sviluppare con successo una teoria dei numeri negativi. In particolare, Brahmagupta dedusse alcune delle importanti proprietà matematiche di questi numeri: per esempio, che «un debito moltiplicato per un debito è una fortuna», ossia che meno per meno dà più. (È interessante notare come questa non sia una regola, bensì una conseguenza degli assiomi della matematica. Se volete imbarcarvi in una sfida divertente, potete provare a dimostrare perché dev'essere così.) Gli europei, dal canto loro, si convinsero che c'erano numeri che potevano risolvere questo genere di equazioni solo nel Quattrocento; di fatto, nella Firenze del Duecento l'uso dei numeri negativi era stato addirittura messo al bando.

Col tempo continuarono ad apparire nuovi numeri, in particolare quando i matematici si trovarono ad affrontare il problema di risolvere un'equazione come $x^2 = -1$. A prima vista, sembra impossibile: in fin dei conti, se prendo un numero positivo e lo elevo al quadrato, otterrò un altro numero positivo; e, come aveva dimostrato Brahmagupta, anche il quadrato di un numero negativo è positivo. Quando i

matematici incontrarono questa equazione, nel Rinascimento, la loro prima reazione fu quella di assumere che la sua soluzione fosse impossibile. In seguito, però, il matematico italiano Rafael Bombelli fece il passo radicale di supporre l'esistenza di un nuovo numero il cui quadrato era uguale a –1, e scoprì che tale numero poteva essere usato per risolvere un'intera schiera di equazioni giudicate irrisolvibili. È interessante notare che, a volte, questo numero immaginario era necessario solo nei calcoli intermedi e veniva poi a sparire dalla risposta finale, lasciando che l'equazione del caso venisse risolta da quei numeri ordinari con cui la gente aveva familiarità.

Era una sorta di alchimia matematica, ma molti si rifiutarono di accogliere i nuovi numeri di Bombelli nel canone della matematica; lo stesso Cartesio ne scrisse in toni piuttosto sprezzanti, liquidandoli come numeri immaginari. Col passare del tempo, però, sempre più matematici si resero conto delle loro potenzialità, ma anche del fatto che il loro uso non sembrava condurre a nessuna contraddizione. Fu solo all'inizio dell'Ottocento, comunque, che questi numeri immaginari trovarono davvero il loro posto in seno alla matematica, grazie in parte a una rappresentazione che aiutò i matematici a visualizzarli.

Se i numeri ordinari (o numeri reali, come vengono oggi chiamati) erano disposti lungo la retta dei numeri, che correva orizzontalmente attraverso la pagina, i numeri immaginari come i (il nome dato alla radice quadrata di –1) erano invece rappresentati sull'asse verticale. Questa rappresentazione bidimensionale dei numeri immaginari o complessi aiutò a far sì che venissero accettati; la sua forza esplicativa venne poi dimostrata dalla scoperta che la sua geometria rifletteva di fatto l'aritmetica dei numeri.

E quindi, è possibile che oltre i confini della nostra conoscenza ci siano altri numeri che non abbiamo ancora scoperto? Potrei provare a scrivere equazioni più bizzarre nella speranza di ottenere altri numeri nuovi. Per esempio, che cosa possiamo dire dell'equazione $x^4 = -1$?

Forse potremmo pensare di aver bisogno di numeri nuovi per risolverla. Uno dei più grandi teoremi dell'Ottocento, oggi noto come il teorema fondamentale dell'algebra, ha però dimostrato che, usando il numero immaginario *i* e i numeri reali, posso risolvere ogni equazione che voglio. Per esempio, se prendo

$$x = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}i$$

e lo elevo alla quarta, la risposta è proprio –1. Abbiamo raggiunto il confine oltre il quale non sarà più possibile trovare nuovi numeri tentando di risolvere delle equazioni.

Dimostrare l'impossibile

La dimostrazione dell'irrazionalità della radice quadrata di 2 da parte degli antichi greci fu la prima delle numerose prove matematiche che mostrano come certe cose siano impossibili. Un'altra dimostrazione dell'impossibile fu il concetto di quadratura del cerchio. Di fatto, l'idea matematica di quadrare il cerchio è entrata in molti idiomi come un'espressione per indicare qualcosa di impossibile. La quadratura del cerchio era una delle sfide geometriche a cui gli antichi greci amavano dedicarsi, tentando di risolverle con l'uso di una riga (senza l'indicazione delle misure) e di un compasso (per tracciare archi di cerchi). Scoprirono dei modi ingegnosi di utilizzare questi strumenti per disegnare triangoli equilateri, pentagoni ed esagoni perfetti.

La quadratura del cerchio consiste nel tentativo di usare questi strumenti per costruire un quadrato che abbia un'area equivalente a quella di un cerchio dato. Nonostante tutti i loro sforzi, i greci non riuscirono a venirne a capo. Una sfida altrettanto impossibile venne posta dall'oracolo dell'isola di Delo. Gli abitanti dell'isola greca lo avevano consultato chiedendo un consiglio su come sconfiggere una pestilenza che Apollo aveva scatenato contro di loro, e lui rispose che avrebbero dovuto raddoppiare la grandezza dell'altare dedicato al dio. L'altare in questione era un cubo perfetto, e

Platone interpretò il responso come una sfida a costruire, usando riga e compasso, un secondo cubo perfetto il cui volume fosse pari al doppio di quello del primo.

Se il secondo cubo ha un volume doppio rispetto al primo, ciò significa che i suoi lati devono avere una lunghezza pari alla radice cubica del doppio di quelli del primo; la sfida, quindi, stava nel costruire una lunghezza uguale alla radice cubica di 2. Costruire la radice quadrata di 2 era semplice, in quanto tale lunghezza corrisponde alla diagonale di un quadrato unitario; la costruzione della radice cubica di 2, però, si rivelò talmente difficile che gli abitanti di Delo furono infine costretti ad arrendersi. Forse l'oracolo aveva proprio voluto distrarli con la geometria e la matematica per distogliere la loro attenzione dai problemi sociali più pressanti che li affliggevano.

I tre problemi classici della duplicazione del cubo, della quadratura del cerchio e della trisezione dell'angolo si dimostrarono tutti impossibili, ma fu solo nell'Ottocento che i matematici riuscirono a provare al di là di ogni dubbio che non c'era modo di risolverli. Fu lo sviluppo della teoria dei gruppi – un linguaggio per la comprensione della simmetria di cui mi servo nelle mie ricerche – a fornire la chiave per dimostrare l'impossibilità di queste costruzioni geometriche. È così emerso che le uniche lunghezze che si possono costruire con riga e compasso sono quelle che sono soluzioni di certi tipi di equazioni algebriche.

Nel caso della quadratura del cerchio, la sfida richiedeva di creare, con riga e compasso, una linea retta di lunghezza $\sqrt{\pi}$ partendo da una linea di lunghezza unitaria. Nel 1882 venne però dimostrato che π non è solo un numero irrazionale, ma è anche un numero trascendentale, il che significa che non è la soluzione di nessuna equazione algebrica; pertanto, quadrare il cerchio è impossibile.

La matematica è eccellente quando si tratta di dimostrare che qualcosa è impossibile. Uno dei teoremi più citati sui libri matematici è l'ultimo teorema di Fermat, che afferma che è impossibile trovare dei numeri interi che risolvano una delle equazioni

$$x^n + y^n = z^n$$

con n maggiore di 2. Diverso è il caso di $n = 2$, che corrisponde all'equazione formulata da Pitagora per i suoi triangoli rettangoli. Se $n = 2$, ci sono molte soluzioni, come per esempio $3^2 + 4^2 = 5^2$; anzi, di fatto ce ne sono infinite, e già gli antichi greci avevano trovato una formula per produrle tutte. Spesso, però, è molto più facile trovare soluzioni che dimostrare che non troveremo mai dei numeri tali da soddisfare una delle equazioni di Fermat.

Fermat pensava di aver trovato una dimostrazione, ma annotò sulla sua copia dell'*Arithmetica* di Diofanto che i margini non gli lasciavano sufficiente spazio per scriverla. Ci vollero altri 350 anni prima che il mio collega di Oxford Andrew Wiles elaborasse un convincente ragionamento per spiegare perché non troveremo mai dei numeri interi che risolvano le equazioni di Fermat. La dimostrazione di Wiles è lunga più di cento pagine, alle quali vanno aggiunte le migliaia di pagine di precedenti lavori su cui è costruita; in effetti, quindi, anche se i margini del libro di Fermat fossero stati molto ampi, non sarebbero bastati comunque.

La dimostrazione dell'ultimo teorema di Fermat è un tour de force, e mi ritengo privilegiato per aver potuto assistere, durante la mia vita, alla sua conclusione.

Prima che Wiles mostrasse l'impossibilità di risolverlo, c'era sempre la prospettiva che forse, da qualche parte, ci fossero dei numeri tali da risolvere una di queste equazioni. Ricordo un grandioso pesce d'aprile che circolò nella comunità matematica più o meno quando Wiles stava per annunciare la sua prova. Lo scherzo affermava che un famoso teorico dei numeri di Harvard, Noam Elkies, aveva prodotto una dimostrazione non-costruttiva dell'esistenza di tali soluzioni. L'e-mail di questo pesce d'aprile era formulata con intelligenza, in quanto la specificazione «non-costruttiva» significava che Elkies non era in grado di indicare esplicitamente quali fossero i numeri che risolvevano le equazioni, ma soltanto di dimostrare che tali soluzioni dovevano esistere. Il bello è che alla maggior parte delle persone l'e-mail venne inoltrata diversi giorni dopo il 1°

aprile, quando lo scherzo aveva iniziato a circolare, e così non ebbero modo di intuire che si trattasse di un pesce.

Pesce d'aprile o no, la comunità matematica aveva trascorso 350 anni senza sapere se ci fosse o meno una soluzione. Non lo sapevamo. Ma ora Wiles ha messo fine al nostro tormento: la sua dimostrazione significa che posso provare con tutti i numeri che voglio, ma non ne troverò mai tre che rendano vera una delle equazioni di Fermat.

Neuroni in via d'esaurimento

Viviamo in un'età dell'oro della matematica, durante la quale alcuni dei grandi problemi irrisolti del passato hanno finalmente trovato una risposta. Nel 2003 una delle grandi sfide della geometria, la congettura di Poincaré, è stata dimostrata dal matematico russo Grigorij Perel'man. Ci sono però ancora numerose asserzioni su numeri ed equazioni di cui non abbiamo una prova: l'ipotesi di Riemann, la congettura dei numeri primi gemelli, la congettura di Birch-Swinnerton-Dyer, la congettura di Goldbach.

Ho dedicato gli ultimi vent'anni delle mie ricerche al tentativo di stabilire se la cosiddetta congettura PORC sia vera o meno. È stata formulata più di cinquant'anni fa dal matematico di Oxford Graham Higman, che credeva che il numero dei gruppi di simmetrie con un determinato numero di simmetrie dovrebbe essere dato da particolari equazioni polinomiali (che è ciò per cui sta la P di PORC). Per esempio, il numero di gruppi di simmetrie con p^6 simmetrie, dove p è un numero primo, è dato da un'espressione quadratica in p: $p^2 + 39p + c$, dove c è una costante che dipende dal resto ottenuto dividendo p per 60.

Le mie ricerche hanno gettato pesanti dubbi sulla verità di questa congettura: ho infatti scoperto un oggetto simmetrico con p^9 simmetrie il cui comportamento suggerisce qualcosa di molto diverso da quanto viene predetto dalla congettura di Higman. Ciò, tuttavia, non dirime del tutto la questione: c'è ancora la possibilità che altri oggetti simmetrici con p^9

simmetrie vengano ad appianare il problema dello strano comportamento che ho messo in luce, salvando la congettura di Higman dalla falsificazione. Così, per il momento, non so se questa congettura sia vera o meno; e Higman, purtroppo, è morto prima di poterlo sapere. Muoio dalla voglia di scoprirlo prima che anche la mia esistenza giunga al termine; sono le questioni come questa a spingermi nelle mie ricerche matematiche.

A volte, quando mi perdo nei tortuosi meandri in apparenza infiniti delle mie ricerche, mi chiedo se il mio cervello avrà mai la capacità di risolvere il problema su cui sto lavorando. Di fatto, la matematica può essere usata per dimostrare che ci sono sfide matematiche trascendenti i limiti fisici del cervello umano, con i suoi 86 miliardi di neuroni connessi da più di 100 trilioni di sinapsi.

La matematica è infinita, non ha fine. A differenza degli scacchi, dove secondo le stime è possibile giocare $10^{10^{50}}$ partite differenti, le asserzioni matematiche dimostrabili sono infinite. Negli scacchi, i pezzi vengono catturati, si vincono le partite e le sequenze si ripetono; la matematica, all'opposto, non ha un finale di partita, cioè anche se faccio lavorare i miei 86 miliardi di neuroni al massimo della loro velocità fisicamente possibile, nel corso della mia vita avrò il tempo di compiere solo un numero finito di passi logici e, di conseguenza, potrò arrivare a conoscere soltanto una parte finita della matematica. E se la dimostrazione della mia congettura PORC richiedesse più passi logici di quelli che potrei mai fare nella mia vita?

Anche se trasformassimo l'intero universo in un grande computer, il campo della nostra possibile conoscenza resterebbe comunque limitato. In un articolo intitolato *Computational Capacity of the Universe*, Seth Lloyd ha calcolato che, partendo dal Big Bang, l'universo non può aver compiuto più di 10^{120} operazioni su un massimo di 10^{90} bit. In ogni momento del tempo, l'universo può conoscere solo una quantità finita di matematica. Forse vi chiederete che cosa sta calcolando l'universo. Di fatto, sta calcolando la propria evoluzione dinamica. Pur trattandosi di un numero immenso, resta pur sempre finito; ciò significa che è possibile dimostrare

che, in ogni momento del tempo, ci saranno sempre delle cose che l'universo osservabile non saprà.

È però emerso che la matematica ha in sé un livello ancora più profondo di ignoto. Anche se disponessimo di un computer con capacità di calcolo e velocità infinite, ci sono comunque cose che non conosceremo mai. Un teorema dimostrato nel XX secolo ha sollevato la raccapricciante possibilità che persino un computer con queste capacità infinite potrebbe non scoprire mai se la mia congettura PORC è vera. Il teorema di incompletezza di Gödel ha fatto tremare la matematica fino al midollo. Può darsi che queste congetture siano vere, ma rimarranno per sempre al di là della nostra capacità di dimostrarle all'interno della nostra cornice assiomatica per la matematica. Gödel ha infatti dimostrato che all'interno di qualunque cornice assiomatica per la matematica ci sono asserzioni matematicamente vere di cui noi, in quella cornice, non saremo mai in grado di dimostrare la verità. Una dimostrazione matematica che ci sono cose oltre la sfera della dimostrazione, che c'è della matematica oltre i confini della nostra conoscenza.

Quando ho incontrato questo teorema all'università, ne sono rimasto sconvolto. Nonostante i limiti fisici del mio cervello (o di quello dell'universo), penso di essere cresciuto nella confortante convinzione che, almeno in linea teorica, là fuori ci fosse una prova che avrebbe dimostrato la verità o meno della mia congettura PORC, o dell'ipotesi di Riemann. Uno dei miei eroi matematici, l'ungherese Paul Erdős, era solito parlare affettuosamente delle dimostrazioni prese «dal Libro». Era lì, secondo Erdős, che Dio teneva le prove più eleganti di ogni teorema; la sfida per un matematico, quindi, era quella di scoprire le prove nel Libro. Per citare una battuta fatta da Erdős durante una lezione da lui tenuta nel 1985: «Non c'è bisogno che crediate in Dio, ma dovreste credere nel Libro». Lui stesso dubitava dell'esistenza di Dio, che aveva soprannominato «il Fascista Supremo» responsabile di nascondergli le calze e il suo passaporto ungherese. Penso che la maggior parte dei matematici sottoscriverebbe la metafora del Libro; tuttavia, la prova che ho studiato nel corso di logica matematica all'università dimostra che dal Libro mancano

delle pagine, pagine di cui neppure il Fascista Supremo è in possesso.

Universi paralleli

La scintilla che avrebbe portato alla scoperta dell'esistenza di asserzioni matematiche la cui verità non può essere dimostrata fu la realizzazione che una delle asserzioni che Euclide aveva usato come assiomi non era affatto così assiomatica come si era creduto.

Un assioma è una premessa o un punto di partenza di una catena di passaggi logici. In generale, un assioma dovrebbe esprimere una verità di per sé evidente accettata come vera senza che ci sia bisogno di dimostrarla. Per esempio, io credo che se prendo due numeri e li sommo, otterrò lo stesso risultato a prescindere dall'ordine con cui lo faccio: se prendo 36 e gli aggiungo 43, non otterrò un risultato diverso da quello a cui arriverei prendendo 43 e aggiungendogli 36. Forse vi chiederete come faccio a sapere che questa regola sarà sempre valida: magari, se sommassi dei numeri di cose grandissimi, potrebbe succedere qualcosa di strano. Ma la matematica fa deduzioni sui numeri che soddisfano questa regola: se il modo in cui contiamo le cose nell'universo portasse a qualcosa di strano, non potremmo far altro che accettare il fatto che la matematica che abbiamo sviluppato da questo assioma non è applicabile al modo in cui i numeri degli oggetti fisici si comportano nell'universo. A quel punto, dovremmo sviluppare una nuova teoria basata su numeri che soddisfino un diverso insieme fondamentale di assiomi.

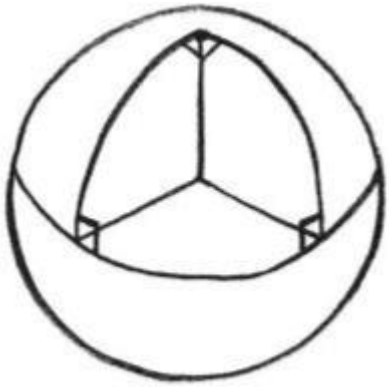
Anche se molti degli assiomi usati da Euclide per dedurre la sua teoria della geometria sembravano verità di per sé evidenti sulla geometria dell'universo, ce n'era uno che i matematici guardavano sempre più con sospetto.

Il postulato delle parallele afferma che se abbiamo una linea e un punto a essa esterno, c'è un'unica linea passante per quel punto che risulta parallela alla prima. Questo postulato suona ovvio se stiamo disegnando la nostra geometria su una pagina

piatta. È uno degli assiomi cruciali nella dimostrazione euclidea che la somma degli angoli interni di un triangolo è pari a 180 gradi; in ogni geometria in cui vale il postulato delle parallele, i triangoli avranno senza dubbio questa proprietà. Nell'Ottocento vennero però scoperti diversi tipi di geometria in cui non ci sono linee parallele o in cui ce ne sono molte, per cui i matematici si resero conto che quella di Euclide era solo una delle tante geometrie possibili.

Per esempio, le linee tracciate sulla superficie di una sfera – una geometria curva – non sono rette, bensì curve. Se prendiamo due punti sulla superficie della Terra, la via più breve che li congiunge – come sa chiunque abbia fatto una trasvolata atlantica – non corrisponde alla linea che tracceremmo su una cartina. Questo perché la linea più breve fra questi due punti fa parte di un cerchio che, come un meridiano, divide la sfera perfettamente a metà (di fatto, se uno dei due punti è il Polo Nord o il Polo Sud, la linea in questione sarà proprio un meridiano). Tutte le linee in questa geometria sono come meridiani che vengono spostati sulla superficie in modo che passino attraverso i due punti che ci interessano; queste linee sono chiamate «circoli massimi». Ma se ora prendiamo un terzo punto esterno a questo circolo massimo, non ci sarà nessun modo di tracciare un altro circolo massimo passante per questo terzo punto che non si intersechi con il primo circolo; pertanto, quella che abbiamo davanti è una geometria dove non ci sono linee parallele.

Di conseguenza, ogni dimostrazione che dipende dal postulato delle parallele non sarà necessariamente vera in questa nuova geometria. Prendiamo la dimostrazione che la somma degli angoli interni di un triangolo è pari a 180 gradi. Tale affermazione dipende da una geometria che soddisfi il postulato delle parallele, cosa che non vale per questa geometria sferica; e, in effetti, in questa geometria la somma degli angoli interni dei triangoli supera i 180 gradi. Prendiamo il Polo Nord e due punti situati sull'equatore e costruiamo il triangolo di cui sono i vertici: la somma complessiva dei suoi angoli sarà senz'altro maggiore di 180 gradi, dato che questo valore viene già raggiunto dalla somma dei due angoli all'equatore.



Un triangolo in cui la somma degli angoli supera i 180 gradi.

Vennero poi scoperte altre geometrie in cui attraverso un punto non passava soltanto una parallela, bensì molte. In queste geometrie, chiamate iperboliche, la somma degli angoli interni dei triangoli è inferiore a 180 gradi. Tali scoperte, comunque, non invalidavano nessuna delle dimostrazioni di Euclide. Questo è un ottimo esempio del perché le scoperte matematiche non distruggono le conoscenze precedenti, ma si limitano ad arricchirle. Tuttavia, l'introduzione di queste geometrie agli inizi dell'Ottocento fece senz'altro sensazione. Di fatto, alcuni matematici ritenevano che una geometria che non soddisfacesse l'assioma di Euclide sulle parallele dovesse contenere qualche contraddizione, cosa che avrebbe portato a scartarla come impossibile. Ulteriori ricerche, però, misero in luce che un'eventuale contraddizione in queste nuove geometrie avrebbe implicato la presenza di una contraddizione nel cuore stesso della geometria euclidea.

Un pensiero del genere era eretico: la geometria euclidea aveva retto alla prova del tempo, non producendo nessuna contraddizione per duemila anni. Ma un momento… tutto questo inizia a sembrare simile al modo in cui facciamo scienza. I matematici dovrebbero essere in grado di dimostrare che la geometria euclidea non darà mai origine a nessuna contraddizione. Non dovremmo accontentarci di credere che è tutto a posto soltanto per il fatto che fino a oggi le cose sono andate bene: questo è il modo in cui lavorano gli scienziati nei loro laboratori, nel dipartimento dall'altra parte della strada. Noi matematici, invece, dovremmo essere in grado di dimostrare che la nostra disciplina è priva di contraddizioni.

Qual è il titolo di questo paragrafo?

Quando, alla fine dell'Ottocento, la teoria matematica degli insiemi produsse strani risultati che sembravano condurre a paradossi irrisolvibili, i matematici iniziarono a prendere più sul serio il bisogno di dimostrare che la nostra disciplina è priva di contraddizioni. Il filosofo britannico Bertrand Russell formulò un buon numero di questi preoccupanti paradossi. Sfidò la comunità matematica proponendo il concetto della classe di tutte le classi che non contengono se stesse come membri: questa classe era un membro di se stessa oppure no? L'unico modo per essere un membro di tale classe è essere una classe che non contiene se stessa; ma non appena la inseriamo in se stessa come membro, diventa subito (com'è ovvio) una classe che contiene se stessa. Argh! Non sembrava esserci via d'uscita per risolvere questo paradosso, eppure non si trattava di una costruzione troppo lontana dalle classi a cui i matematici si interessavano normalmente.

Russell presentò anche alcuni esempi più semplici e prosaici di questa sorta di paradossi dell'autoreferenzialità. Per esempio, immaginò un'isola dove una legge stabiliva che il barbiere doveva radere tutte le persone che non si radevano da sole, e solo quelle. Il guaio è che ciò conduce a un paradosso: il barbiere può radere se stesso? No, dato che la legge gli consente di radere soltanto chi non si rade da solo. Ma allora viene a qualificarsi come uno che deve farsi radere dal barbiere. Argh, di nuovo! Il barbiere ha preso il posto della classe che Russell stava tentando di definire.

Penso che il mio esempio preferito fra tutti questi paradossi sia quello della descrizione dei numeri. Supponete di considerare tutti i numeri definibili usando meno di venti parole prese dall'*Oxford English Dictionary*. Per esempio, «1729» può essere definito come «il numero più piccolo che può essere scritto come la somma di due cubi in due modi differenti». Dato che nell'*Oxford English Dictionary* c'è solo un numero finito di parole e che noi possiamo usarne al massimo venti, ne segue che non possiamo definire tutti i numeri in questo modo, in quanto i numeri sono infiniti mentre

le frasi con meno di venti parole sono un numero finito. Così, c'è un numero che può essere definito nel seguente modo: «Il più piccolo numero che non può essere definito in meno di venti parole prese dall'*Oxford English Dictionary*». Ma, un momento: l'ho appena definito in meno di venti parole! Argh!

Il linguaggio naturale è incline a generare affermazioni paradossali. Il semplice fatto che si possano mettere insieme delle parole non significa che queste parole così combinate abbiano un senso o un valore di verità. L'aspetto preoccupante del paradosso di Russell sulla classe di tutte le classi che non contengono se stesse, però, è che è molto vicino a quella sorta di cose che potremmo voler definire in termini matematici.

I matematici trovarono infine delle strategie per aggirare questa situazione paradossale, strategie che richiedevano di raffinare l'idea intuitiva di classe o insieme, ma il senso di preoccupazione rimaneva. Quante altre sorprese di questo genere erano nascoste all'interno dell'edificio matematico? Quando venne invitato a tenere un discorso al Congresso internazionale di matematica del 1900, il grande matematico tedesco David Hilbert decise di presentare i 23 più grandi problemi irrisolti su cui avrebbero dovuto lavorare i matematici nel Novecento; il secondo punto del suo elenco era dimostrare che la matematica fosse priva di contraddizioni.

Nel suo intervento, Hilbert fece un'ardita dichiarazione in cui ribadì quello che molti consideravano come il mantra della matematica: «Questa convinzione che ogni problema matematico sia risolvibile è un potente incentivo per chi lavora. Sentiamo in noi l'eterna chiamata che ci dice che se c'è il problema, dobbiamo cercare la sua soluzione. Possiamo trovarla per mezzo della pura ragione, perché in matematica non c'è nessun *ignorabimus*». In matematica non c'è nulla che non possiamo conoscere. Una dichiarazione davvero audace.

Hilbert stava reagendo a un crescente movimento che, al volgere dell'Ottocento, sosteneva che la nostra capacità di comprendere l'universo avesse dei limiti. In un discorso tenuto all'Accademia di Berlino nel 1880, il celebre fisiologo Emil Du Bois-Reymond aveva presentato 7 misteri sulla natura che, secondo lui, si ponevano oltre la sfera della conoscenza,

dichiarando che si trattava di cose che non conosciamo né mai conosceremo: «*Ignoramus et ignorabimus*».

Alla luce del mio tentativo di comprendere quali problemi potrebbero essere al di là della portata della conoscenza, è interessante confrontare il mio elenco con i 7 misteri presentati da Du Bois-Reymond:

1. La natura ultima della materia e della forza
2. L'origine del moto
3. L'origine della vita
4. L'apparente teleologia della natura
5. Le origini delle sensazioni semplici
6. Le origini del pensiero intelligente e del linguaggio
7. La questione del libero arbitrio

Du Bois-Reymond credeva che i punti 1, 2 e 5 fossero autenticamente trascendenti. I primi due sono in gran parte ancora al cuore delle domande che ci siamo posti nei primi Confini. La teleologia della natura si riferisce al motivo per cui l'universo sembra essere regolato alla perfezione per la vita, una questione che ci tormenta ancora oggi; al momento, la nostra migliore risposta a questo enigma è l'idea del multiverso. Le ultime tre erano il tema del precedente Confine, dove abbiamo sondato i limiti della mente umana. Il mistero dell'origine della vita è forse l'unico su cui abbiamo fatto progressi; nonostante lo stupefacente sviluppo della scienza negli ultimi cento anni, gli altri sei problemi sono tuttora potenzialmente oltre i limiti della conoscenza, proprio come credeva Du Bois-Reymond.

Ma Hilbert non aveva nessuna intenzione di lasciare che nell'elenco di Du Bois-Reymond entrassero anche le asserzioni matematiche. Trent'anni dopo, il 7 settembre 1930, quando tornò nella sua città natale di Königsberg per ricevere la cittadinanza onoraria, Hilbert concluse il suo discorso di accettazione con un appello ai matematici:

> Per il matematico non c'è nessun *Ignorabimus*; e, a parer mio, non c'è neppure per la scienza naturale […] La vera ragione per cui nessuno è riuscito a trovare un problema insolubile è, secondo me, che non ci sono problemi insolubili. In contrasto con l'insensato *Ignorabimus*, il nostro credo afferma: *Wir müssen wissen. Wir werden wissen*. [Noi dobbiamo conoscere. Noi conosceremo.]

Hilbert non era però al corrente del sorprendente annuncio fatto proprio a Königsberg in una conferenza tenuta la vigilia della cerimonia. La matematica, di fatto, contiene l'*ignorabimus*. Un logico austriaco venticinquenne, Kurt Gödel, aveva dimostrato che era impossibile dimostrare se la matematica fosse priva di contraddizioni. E si era spinto oltre: all'interno di una qualunque cornice assiomatica per la matematica, ci saranno asserzioni vere sui numeri che non possono essere dimostrate come vere all'interno di quella cornice. L'appello di Hilbert – «*Wir müssen wissen. Wir werden wissen*» – avrebbe infine trovato il suo giusto posto: sulla lapide dello stesso Hilbert. La matematica avrebbe dovuto far fronte alla rivelazione che anche in essa ci sono misteri che non saremo mai in grado di risolvere.

La seguente affermazione è falsa

Il titolo di questo paragrafo è vero.

Per la sua devastante dimostrazione delle limitazioni della matematica, Gödel attinse alle asserzioni autoreferenziali come quella che ho trovato nel mio cracker natalizio.

Anche se sappiamo che le affermazioni nel linguaggio naturale potrebbero dare adito a paradossi, quando si tratta di asserzioni sui numeri ci aspettiamo che siano vere oppure false. Gödel era affascinato dal problema di sapere se fosse possibile sfruttare l'idea di autoreferenzialità nelle asserzioni matematiche. La stessa sfida di Hilbert aveva già un elemento autorefenziale intrinseco: voleva costruire un argomento matematicamente solido per dimostrare che la matematica era priva di contraddizioni. La sfida aveva già richiesto che la matematica guardasse in se stessa per dimostrare che non avrebbe potuto dimostrare la verità di due asserzioni fra loro contraddittorie.

Gödel voleva mostrare che all'interno di ogni sistema assiomatico per la teoria dei numeri ci sarebbero sempre state delle asserzioni vere sui numeri che non potevano essere dimostrate partendo da quegli stessi assiomi. Vale la pena di

sottolineare che, per cercare di esprimere il funzionamento dei numeri, possiamo formulare diversi insiemi di assiomi. La speranza di Hilbert era che i matematici potessero costruire un sistema assiomatico che permettesse di dimostrare tutte le verità della matematica, ma Gödel trovò un modo per affossare questa sua speranza.

L'ingegnoso trucco escogitato da Gödel consisteva nell'elaborare un sistema di codifica che assegnava a ogni asserzione significativa sui numeri un suo codice numerico. Un'idea simile è all'opera proprio mentre sto scrivendo al computer. Le parole che uso per raccontare la storia di Gödel vengono infatti convertite in stringhe di numeri che rappresentano le lettere che sto battendo: per esempio, in decimale ASCII «Gödel» diventa il numero 71246100101108. Il vantaggio della codifica elaborata da Gödel è che permette alla matematica di parlare di se stessa.

In base al codice di Gödel, ogni assioma che scegliamo per catturare la teoria dei numeri – le asserzioni da cui deduciamo i teoremi della matematica – avrà un proprio codice numerico: per esempio, l'assioma «se $A = C$ e $B = C$, allora $A = B$» ha un suo codice numerico. Ma anche le asserzioni che possono essere dedotte da questi assiomi, come «esistono infiniti numeri primi», avranno dei loro codici numerici; e anche le asserzioni false, come «17 è un numero pari», avranno un codice numerico.

Grazie a questi codici numerici, Gödel poteva interrogarsi nel linguaggio della teoria dei numeri sulla possibilità che una particolare asserzione fosse dimostrabile all'interno del sistema. L'idea di base è quella di strutturare il codice in modo tale che un'asserzione sia dimostrabile se il suo codice numerico è divisibile per i codici numerici degli assiomi. In realtà la questione è molto più complicata, ma questa può essere considerata un'utile semplificazione.

Gödel poteva così parlare della possibilità che un'asserzione fosse dimostrabile o meno a partire dagli assiomi come se anche quest'ultima fosse un'asserzione sui numeri. Con questa impostazione, «l'asserzione "ci sono infiniti numeri primi" può essere dimostrata a partire dagli assiomi della teoria dei

numeri» viene a tradursi in: «Il codice numerico dell'asserzione "ci sono infiniti numeri primi" è divisibile per i codici numerici degli assiomi della teoria dei numeri» – un'asserzione puramente matematica sui numeri che è vera oppure falsa.

Preparatevi ora a seguirmi tra i meandri logici della dimostrazione di Gödel… Gödel decise di prendere l'asserzione *A*: «Questa asserzione non è dimostrabile». *A* ha un proprio codice numerico, ma se analizziamo il suo contenuto, vediamo che si traduce in un'asserzione che riguarda semplicemente il fatto che il suo codice numerico non sia divisibile per i numeri di codice degli assiomi. Supponiamo ora che il sistema assiomatico per la teoria dei numeri che stiamo analizzando non conduca a contraddizioni, come sperava Hilbert.

Grazie alla codifica ideata da Gödel, *A* è ora semplicemente un'asserzione che riguarda dei numeri. Il numero di codice di *A* può essere divisibile per i numeri di codice degli assiomi oppure non esserlo. *A* dev'essere vera o falsa; non può essere entrambe le cose, perché ciò andrebbe contro la nostra ipotesi per cui il sistema non conduce a contraddizioni.

Supponiamo che *A* sia dimostrabile a partire dagli assiomi della teoria dei numeri; ciò implica che il codice numerico di *A* è divisibile per quelli degli assiomi. Ma un'asserzione dimostrabile è vera. Se ora però analizziamo il significato di *A*, vediamo che afferma che il codice numerico di *A* non è divisibile per quelli degli assiomi. Siamo caduti in una contraddizione. Noi però stiamo presupponendo che la matematica non contenga contraddizioni. A differenza del paradosso del mio cracker natalizio, dev'esserci un modo per uscire da questo rompicapo logico.

Il modo per risolverlo consiste nel rendersi conto che la nostra precedente ipotesi è falsa: che, cioè, non possiamo dimostrare che *A* è vera a partire dagli assiomi della teoria dei numeri. Ma questo è esattamente ciò che *A* afferma; pertanto, *A* è vera. Siamo così riusciti a dimostrare che *A* è un'asserzione vera che non può essere dimostrata come tale partendo dagli assiomi.

Questa dimostrazione vi ricorderà forse quella con cui abbiamo stabilito che la radice quadrata di 2 è irrazionale: siamo partiti ipotizzando che non lo fosse ma poi, vedendo che ciò portava a una contraddizione, abbiamo concluso che la radice quadrata di 2 dev'essere di fatto irrazionale. Entrambe queste dimostrazioni dipendono dall'importante ipotesi che gli assiomi della teoria dei numeri non conducano a contraddizioni. Una delle conseguenze sorprendenti della dimostrazione di Gödel è che non è possibile salvare la matematica aggiungendo una di queste asserzioni indimostrabili come un nuovo assioma. Potreste infatti chiedervi: se l'asserzione *A* è vera ma indimostrabile, perché non limitarsi a renderla un assioma? Forse, allora, tutte le asserzioni vere saranno dimostrabili. La dimostrazione di Gödel, però, mostra che, per quanti assiomi si aggiungano al sistema, ci saranno sempre delle asserzioni vere indimostrabili.

Non preoccupatevi se dopo questo balletto logico in cui Gödel ci ha condotti vi gira un po' la testa. Pur avendo studiato questo teorema un sacco di volte, anch'io quando arrivo alla fine della dimostrazione resto sempre un po' stordito: le sue implicazioni sono davvero sorprendenti. Gödel ha comprovato matematicamente che all'interno di qualunque cornice assiomatica per la teoria dei numeri esente da contraddizioni ci sono asserzioni vere sui numeri la cui verità non può però essere dimostrata all'interno di tale cornice; una dimostrazione matematica del fatto che la matematica ha i suoi limiti. La cosa intrigante è che l'asserzione *A* non è inconoscibile: anzi, di fatto abbiamo dimostrato che è vera, solo che per farlo abbiamo dovuto lavorare al di fuori di quella particolare cornice assiomatica di cui abbiamo dimostrato i limiti. Ciò che Gödel ci ha fatto vedere è che è impossibile dimostrare che *A* è vera all'interno di tale cornice.

Gödel usò quindi questa rivelazione già di per sé devastante, nota come il primo teorema di incompletezza, per distruggere la speranza di Hilbert che fosse possibile trovare una prova matematica a riprova che la matematica fosse priva di contraddizioni. Con il primo teorema, Gödel ha dimostrato che «questa asserzione non è dimostrabile» è vera sotto l'ipotesi che la matematica non contenga contraddizioni. Ora, se

potessimo dimostrare matematicamente che non ci sono contraddizioni, questa dimostrazione potrebbe essere usata per formulare, all'interno della matematica, una prova della verità dell'asserzione «questa asserzione non è dimostrabile»; ma questa sarebbe una contraddizione, in quanto l'asserzione afferma di non poter essere dimostrata. Pertanto, ogni dimostrazione che la matematica sia priva di contraddizioni porterebbe inevitabilmente a una contraddizione. Siamo tornati di nuovo alle nostre asserzioni autoreferenziali, e l'unico modo per uscirne sta nell'accettare il fatto che non possiamo dimostrare matematicamente che la matematica è libera dalle contraddizioni. Questo è il cosiddetto secondo teorema di incompletezza di Gödel, che, con orrore di Hilbert, ha mostrato come l'*ignorabimus* stia al cuore della matematica.

Ma i matematici credono che la loro disciplina sia libera dalle contraddizioni. Se ci fossero, come avremmo potuto arrivare fin qui senza che l'edificio crollasse? Se una teoria è priva di contraddizioni, diciamo che è coerente. Il matematico francese André Weil ha riassunto in questi termini le devastanti implicazioni del lavoro di Gödel: «Dio esiste perché la matematica è coerente, e il Diavolo esiste perché non possiamo dimostrarlo».

Le rivelazioni di Gödel significano che la matematica è aperta alla falsificazione come ogni altra teoria scientifica? Potremmo anche aver trovato il modello giusto ma, proprio come nel caso di un modello dell'universo o delle particelle fondamentali, non possiamo escludere la possibilità che questo nostro modello vada all'improvviso in frantumi sotto il peso di nuove evidenze.

Per alcuni filosofi c'era qualcosa di affascinante nel fatto che, anche se non possiamo dimostrare che l'asserzione *A* è vera all'interno del sistema assiomatico per la teoria dei numeri, abbiamo perlomeno dimostrato la sua verità lavorando all'esterno di quel sistema: ciò, infatti, sembrava implicare che il cervello umano è più di una semplice macchina di calcolo per analizzare matematicamente il mondo. In un articolo intitolato «Minds, Machines and Gödel», presentato all'Oxford Philosophical Society nel 1959, il filosofo John Lucas argomentò che se modellassimo la mente come una

macchina che segue gli assiomi e le regole deduttive dell'aritmetica, ne seguirebbe che tale macchina, macinando una dimostrazione dopo l'altra, arriverebbe a un certo punto a imbattersi nella frase «questa asserzione non è dimostrabile», e trascorrerebbe quindi il resto del suo tempo a tentare di dimostrarla o di confutarla; noi invece, come esseri umani, possiamo riconoscere che è indecidibile comprendendo il contenuto del suo significato. «Così, il modello della macchina non è adeguato per descrivere la mente […] che sa sempre far di meglio di qualunque sistema formale, fossilizzato, morto.»

Sembra un ragionamento molto attraente: chi non vorrebbe credere che noi umani siamo più di un semplice strumento di calcolo, che non siamo solo una sorta di app installata su qualche hardware biologico? Nelle sue recenti ricerche sulla coscienza, Roger Penrose ha usato l'argomento di Lucas come una base per la sua convinzione che abbiamo bisogno di una nuova fisica per comprendere che cos'è che rende la mente cosciente. Ma anche se è vero che noi riconosciamo la verità dell'asserzione «questa asserzione non è dimostrabile» lavorando all'esterno del sistema, ciò avviene comunque anche sotto un'enorme assunzione, ossia che il sistema in cui stiamo lavorando per dimostrare la verità di questa asserzione di Gödel è esso stesso privo di contraddizioni. E questo è il contenuto del secondo teorema di incompletezza: non possiamo dimostrarlo.

Da un punto di vista matematico, il genere di asserzione vera ma non dimostrabile che Gödel ha usato potrebbe sembrare un po' esoterico. Le asserzioni davvero interessanti sui numeri – l'ipotesi di Riemann, la congettura di Goldbach, la congettura PORC – non saranno indimostrabili, vero? Purtroppo, la speranza che siano solo le tortuose asserzioni gödeliane a trascendere la possibilità di dimostrazione si è rivelata falsa. Nel 1977, i matematici Jeff Paris e Leo Harrington hanno trovato un'asserzione genuinamente matematica sui numeri di cui hanno potuto mostrare che è vera ma indimostrabile all'interno del sistema assiomatico classico per la teoria dei numeri. Nel prossimo capitolo, però, vedremo che i matematici, affrontando l'idea di infinito, hanno scoperto

che non solo alcune asserzioni sono indimostrabili, ma che è anche impossibile dire se siano vere oppure false.

Una barzelletta

Dopo aver letto questo capitolo e il Terzo Confine, siete ora pronti per una delle altre barzellette contenute nei miei paradossali cracker natalizi. L'unica altra cosa che dovete sapere è che il linguista e filosofo americano Noam Chomsky ha posto una distinzione fra competenza linguistica (la conoscenza linguistica posseduta da una cultura) e performance linguistica (il modo in cui il linguaggio viene usato nella comunicazione). Ma eccovi la barzelletta:

> Heisenberg, Gödel e Chomsky entrano in un bar. Heisenberg si guarda attorno e dice: «Dato che siamo in tre, e dato che siamo in un bar, questa dev'essere una barzelletta. Ciò che resta da vedere è se sia divertente oppure no».
>
> Gödel ci pensa per un momento e quindi dichiara: «Be', dato che siamo all'interno della barzelletta, non possiamo stabilire se sia divertente. Per farlo, dovremmo guardarla dall'esterno».
>
> Chomsky li guarda entrambi e conclude: «Certo che è divertente. È solo che la state raccontando male».

14

> «Il silenzio eterno di questi spazi infiniti mi atterrisce.»
>
> BLAISE PASCAL, *Pensées*

Come abbiamo scoperto nel Quarto Confine, nell'universo fisico in cui abitiamo la nostra possibilità di osservare ed esplorare non si estende all'infinito, ma ha dei limiti. Io, comunque, dedico la mia vita non all'esplorazione dell'universo fisico ma a quella di un universo mentale di verità matematiche. Qui non mi servono telescopi, astronavi o microscopi; mi avvalgo di altri strumenti per sondare i limiti di questo mondo. Anzitutto, la questione se sia infinito o meno può essere risolta con i mezzi finiti di cui la mia testa è dotata. La matematica ci fornisce un modo per superare le barriere che ci impediscono di esplorare i confini dell'universo fisico. Non esiste un numero più grande di tutti: di fronte a ogni tentativo di erigere un muro nell'universo dei numeri, posso sempre aggiungere 1. E questo semplice atto finito di aggiungere 1 mi offre un modo per costruire infiniti mondi della mente.

Ma quanto può estendersi la mia conoscenza di questi mondi infiniti? Nell'esplorare le verità dell'universo infinito dei numeri, ci sono limiti oltre i quali i miei strumenti neuronali finiti non possono spingersi? Prima del XIX secolo, infinito era sinonimo di «al di là della conoscenza»; tuttavia, da quando le arti arcane della matematica hanno fatto la loro comparsa nell'antica Grecia, gli esseri umani hanno continuato a usare le loro menti finite per navigare nell'infinito.

Guardare nell'infinito

Ecco un'altra delle barzellette matematiche contenute nei nostri cracker di Natale:

> Maestro: Qual è il numero più grande?
>
> Studente: Settantatré milioni e dodici.
>
> Maestro: Uhm, e che dire di settantatré milioni e tredici?
>
> Studente: Be', ci sono andato vicino!

Gli antichi greci erano consapevoli del fatto che i numeri non hanno un limite, ma ciò era comunque diverso dal ritenere che l'infinito esistesse realmente. Aristotele pose una distinzione tra infinito potenziale e infinito attuale: c'è sempre la possibilità di continuare ad aggiungere 1 a ogni numero, ma non è possibile arrivare ad avere di fatto un'infinità di numeri. Ciononostante, è sorprendente come i greci fossero in grado di utilizzare degli argomenti logici finiti per esplorare questo infinito potenziale.

Per esempio, una delle prime grandi dimostrazioni matematiche che si trovano negli *Elementi* di Euclide è la spiegazione che, in mezzo all'universo dei numeri, c'è un infinito numero di numeri indivisibili, che noi chiamiamo numeri primi. Anche oggi questa dimostrazione continua a darmi un brivido d'eccitazione: l'idea che qualcosa che sembra infinito e intrattabile può comunque essere compreso.

Forse vi chiederete: una volta che abbiamo ammesso la possibilità che i numeri siano illimitati, perché la dimostrazione dell'esistenza di infiniti numeri primi dovrebbe essere così straordinaria? In fondo, sapere che ci sono infiniti numeri pari non è poi così sorprendente una volta che abbiamo scoperto che i numeri sono infiniti. Tuttavia, è il fatto che noi non siamo ancora giunti a un'autentica comprensione della natura dei primi a rendere questa dimostrazione così sorprendente. Essa ci mostra infatti che l'insieme dei primi è infinito pur senza poter indicare dove siano. Il problema di stabilire se l'universo fisico sia o meno infinito potrebbe richiedere un approccio simile: vale a dire un argomento logico che implichi che l'universo deve estendersi per sempre, anche se noi non siamo fisicamente in grado di vederlo.

Nonostante i successi degli antichi greci, l'infinito ha continuato a dare problemi per millenni. La maggior parte delle persone lo consideravano come l'espressione di qualcosa che andava oltre la nostra comprensione. Nel XIII secolo, il teologo e filosofo cristiano Tommaso d'Aquino scrisse:

> Ma ciò [l'esistenza di una molteplicità infinita attuale] è insostenibile. Infatti ogni molteplicità appartiene necessariamente a una qualche specie di molteplicità. Ora, le specie della molteplicità corrispondono alle specie dei numeri; d'altra parte nessuna specie del numero è infinita, poiché ogni numero non è altro che una moltitudine misurata dall'unità: è perciò impossibile che si dia una molteplicità infinita in atto, né per se né per accidens. (*Summa theologiae*, I, q. 7, a. 4)

Le discussioni sull'infinito non si allontanavano mai troppo dalle questioni teologiche. Nel V secolo, il filosofo cristiano sant'Agostino scrisse nella sua opera più famosa, *La città di Dio*, che l'infinito era riservato alla mente di Dio. Considerava con sprezzo quanti credevano che l'infinito trascendesse anche la mente di Dio:

> Riguardo poi all'altra loro tesi, secondo cui neanche con la scienza di Dio si potrebbero comprendere infinite cose, resta soltanto che osino affermare, sprofondando nell'abisso dell'empietà, che Dio non conosce la totalità dei numeri […] Chi sarebbe così folle da dire una cosa del genere? […] Che razza di omuncoli siamo noi, che pretendiamo di porre limiti alla sua scienza? (*De civitate Dei*, XII, 18)

Il filosofo medievale d'Oresme, che contemplò l'idea per cui oltre la sfera celeste che racchiudeva il nostro universo ci potesse essere uno spazio infinito, era anche abile nel manipolare gli infiniti matematici. Fu il primo a dimostrare il sorprendente fatto che, continuando a sommare le frazioni $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \ldots$, possiamo ottenere un risultato grande a piacere. Fu inoltre uno dei primi a prendere in considerazione l'idea che fosse possibile confrontare la grandezza di infiniti differenti; in fin dei conti, se confrontiamo l'infinità di tutti i numeri con l'infinità dei numeri pari, possiamo mettere in coppia ogni numero intero con il suo doppio. Tuttavia, dato che i numeri pari sono chiaramente un sottoinsieme più piccolo di quello di tutti i numeri, d'Oresme concluse che confrontare gli infiniti era un'operazione rischiosa.

Per secoli, molti hanno ritenuto che gli argomenti di questo genere dimostrassero che l'infinito non poteva avere un'esistenza reale. Nel Trecento, il chierico e matematico

inglese Thomas Bradwardine aveva usato un'idea simile per dimostrare che il mondo non era eterno. Se il mondo fosse eterno – affermava – il numero delle anime femminili e il numero di tutte le anime sarebbero infiniti. Ma se questi due insiemi fossero infiniti, sarebbe possibile mettere ogni membro dell'uno in coppia con un membro dell'altro; in questo modo, però, non ci sarebbe più spazio per le anime maschili. Pertanto, l'ipotesi dell'esistenza di un'infinità di anime porta a una contraddizione.

Diversi secoli dopo, l'infinito teneva ancora legati i matematici. Galileo incontrò problemi simili a quelli di d'Oresme e Bradwardine quando si ritrovò a considerare il numero dei numeri quadrati. Da un lato, è chiaro che ci sono più numeri che non sono numeri quadrati di numeri che possono scriversi come un quadrato: i numeri quadrati – 1, 4, 9, 16, 25, … – si fanno sempre più radi, e man mano che procediamo troviamo sempre più numeri non quadrati fra due numeri quadrati successivi. Dal lato opposto, però, non era forse vero che ogni numero è la radice quadrata di un numero quadrato? Da questo punto di vista, quindi, ogni numero poteva essere messo in coppia con un numero quadrato, portando alla conclusione che il numero dei numeri quadrati e quello di tutti i numeri coincidevano.

Come d'Oresme prima di lui, Galileo era sconcertato da questo fatto. Come scrisse nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*:

> Queste [le difficoltà nello studio dell'infinito] son di quelle difficoltà che derivano dal discorrer che noi facciamo col nostro intelletto finito intorno a gl'infiniti, dandogli quelli attributi che noi diamo alle cose finite e terminate; il che penso che sia inconveniente, perché stimo che questi attributi di maggioranza, minorità ed egualità non convenghino a gl'infiniti, de i quali non si può dire, uno esser maggiore o minore o eguale all'altro. (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Giornata prima)

Fu poco dopo la morte di Galileo che venne introdotto il simbolo oggi familiare che rappresenta l'infinito. Il simbolo ∞ fu usato per la prima volta dal matematico inglese John Wallis nel 1655, che lo scelse per esprimere l'idea di una curva percorribile infinite volte.

Per altri due secoli, i matematici si accontentarono dell'idea di un infinito potenziale senza abbracciare quella della reale

esistenza dell'infinito, che sembrava causare troppi problemi. Come scrisse il matematico ottocentesco Carl Friedrich Gauss in una lettera al collega Heinrich Christian Schumacher:

> Protesto contro l'uso di una grandezza infinita come qualcosa di completo, cosa che in matematica non può mai essere permessa. «Infinito» è soltanto un modo di dire.

Addomesticare l'infinito

Quindi, alla fine dell'Ottocento, avvenne un cambiamento intellettuale: grazie al cervello finito di un uomo, l'infinito sembrò essere alla portata della nostra conoscenza.

Per Georg Cantor, l'infinito non era semplicemente un modo di dire, bensì un oggetto matematico tangibile:

> La paura dell'infinito è una forma di miopia che distrugge la possibilità di vedere l'infinito attuale, anche se esso nella sua forma più alta ci ha creati e ci sostiene e, nelle sue forme secondarie transfinite, ci circonda ovunque e abita persino nelle nostre menti.

Forse vi potreste aspettare che alla fine del XIX secolo ci fosse una separazione tra chi praticava la scienza e chi seguiva la religione; Georg Cantor, tuttavia, le abbracciava entrambe e ammetteva che la religione aveva influenzato le sue idee matematiche. Con uno spirito simile a quello di Bruno, che aveva contemplato un universo infinito, Cantor vedeva nella fede in Dio l'ipotesi da cui dedurre l'esistenza necessaria dell'infinito:

> Una dimostrazione si basa sul concetto di Dio. Innanzitutto, dalla suprema perfezione di Dio deduciamo la possibilità della creazione del transfinito; quindi, dalla sua grazia e dal suo splendore deduciamo la necessità che la creazione del transfinito abbia di fatto avuto luogo.

La proposta di Cantor riguardo al modo di affrontare l'infinito risale ad alcune delle idee contemplate da d'Oresme. Dire che due insiemi di cose hanno la stessa grandezza significa trovare un modo di mettere in coppia ogni membro di un insieme con un membro dell'altro, in modo tale che ciascun membro dei due insiemi venga a far parte di una e una sola coppia.

L'approccio di Cantor all'infinito era quello di pensare i matematici come una tribù che aveva delle parole solo per

indicare i numeri 1, 2 e 3, oltre il quale ogni numero veniva semplicemente chiamato «un mucchio» (la versione tribale dell'infinito). Due tribù che si incontrano ma non hanno nomi per i numeri oltre il tre sono comunque in grado di confrontare le grandezze e vedere quale tribù è più grande: i membri della prima vengono messi in coppia con quelli della seconda, e la tribù dove rimangono delle persone spaiate ha il «mucchio» più grande. Se invece le tribù corrispondono esattamente, i loro «mucchi» hanno la stessa grandezza.

Questa è una buona descrizione della matematica del regno animale: è probabile che gli animali non abbiano dei nomi per i numeri, tuttavia sono in grado di valutare qual è il gruppo più grande. Lo sviluppo di un senso della grandezza ha un'importanza chiave per la loro sopravvivenza: se un gruppo di animali ne incontra un altro, i suoi membri devono valutare in fretta se il loro gruppo è più grande o più piccolo di quello che hanno di fronte; se è più grande combattono, se è più piccolo scappano. Non occorre dare un nome ai numeri per operare questo confronto: mettono in coppia i membri di ciascun gruppo e sanno che il gruppo in cui restano dei membri spaiati è il più grande.

Sfruttando l'idea di mettere in coppia gli oggetti, Cantor fu in grado di proporre un metodo per stabilire se due insiemi infiniti fossero numericamente identici oppure no. Per esempio, potremmo essere tentati di affermare che i numeri pari sono la metà di tutti i numeri. Cantor ha però mostrato, come aveva già suggerito d'Oresme, che c'è un modo per disporre questi due insiemi di numeri in modo tale che ciascun numero abbia il suo compagno. Per esempio, 1 viene messo in coppia con 2, 2 con 4, 3 con 6 e n con $2n$; così, emerge che questi due insiemi hanno la stessa grandezza. La tribù numerata con i numeri pari sarà quindi in grado di tener testa a quella numerata con tutti i numeri; questi insiemi infiniti sono identici in grandezza.

Questo argomento è simile a quelli proposti da d'Oresme e Galileo, turbati però dal fatto che, sotto un'altra prospettiva, i numeri pari (o i numeri quadrati) sono un sottoinsieme di tutti i numeri e quindi, in un certo senso, dovrebbero essere un insieme più piccolo. Cantor riteneva invece che, per giudicare

se due insiemi avessero la stessa grandezza, bastava trovare un singolo modo per mettere in coppia i loro membri. Nel caso degli insiemi finiti, se tentiamo di appaiare i loro membri e non ci riusciamo, nessun riordinamento o risistemazione dei due insiemi potrà mai metterci in condizione di accoppiare esattamente ogni membro dell'uno con un membro dell'altro; mentre nel caso dell'infinito Cantor si era reso conto che risistemare l'ordine degli insiemi potrebbe aiutarci a trovare un nuovo modo di metterli in coppia così che non rimanga nessun membro spaiato.

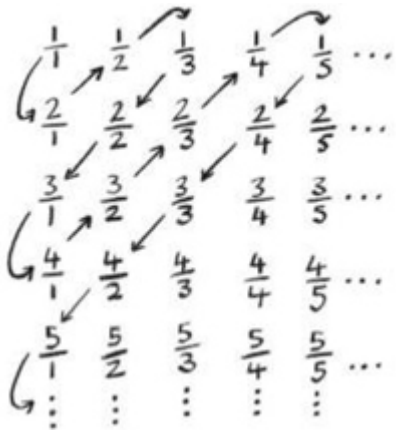
La chiave, per Cantor, è che se c'è un possibile modo di mettere in coppia i membri di ciascun insieme senza che nessuno di essi rimanga fuori, possiamo concludere che questi due insiemi hanno la stessa grandezza. Ci possono essere dei modi di creare le coppie che lasciano spaiati alcuni membri della tribù: per esempio, se metto in coppia soltanto tutti i numeri pari di ciascun gruppo, nell'insieme di tutti i numeri rimarranno infiniti numeri dispari spaiati. Per Cantor, tuttavia, un insieme di numeri può essere considerato davvero più grande solo se non esiste nemmeno un modo di accoppiare i due insiemi senza lasciare resti.

Per esempio, che cosa possiamo dire di un insieme di numeri come quello delle frazioni? Quanto è grande questo infinito? Cantor mise a punto un modo ingegnoso di confrontare tutti i numeri interi con tutte le frazioni e dimostrare che i due insiemi sono identici in grandezza. A prima vista, sembrerebbe impossibile: tra due numeri interi successivi, infatti, c'è un numero infinito di frazioni. Tuttavia, esiste un metodo per appaiare perfettamente tutti i numeri interi con tutte le frazioni, in modo che nessuna frazione rimanga spaiata.

Partiamo da una tabella che contenga tutte le frazioni, con un numero infinito di righe e di colonne; l'n-esima colonna consiste in un elenco di tutte le frazioni $1/n$, $2/n$, $3/n$, …

In che modo Cantor riesce ad appaiare i numeri interi con le frazioni riportate in questa tabella? Il trucco consiste, innanzitutto, nel tracciare diagonalmente un serpente che passa attraverso le frazioni, come illustrato nella seguente figura.

Quindi, al fine di appaiare i numeri interi con tutte le frazioni, dobbiamo seguire questo percorso serpeggiante, accoppiando quindi 1 con 1/1, 2 con 2/1, 3 con 1/2, 4 con 1/3 e così via; il numero 9, per esempio, va in coppia con 2/3, la nona frazione che incontriamo seguendo questo percorso serpeggiante che attraversa la tabella delle frazioni. Dato che il serpente copre l'intera tabella, ogni frazione verrà così messa in coppia con un numero intero.



È un'argomentazione bella e sorprendente. Se mi dovessero portare su un'isola deserta consentendomi di prendere con me soltanto otto teoremi, il serpente di Cantor sarebbe uno di essi. È straordinario come Cantor abbia trovato un modo di mettere in coppia tutte le frazioni con i numeri interi, mostrando che i due insiemi hanno lo stesso ordine di grandezza.

Infinito non numerabile

A questo punto, inizia a sembrare che tutti gli infiniti abbiano la stessa grandezza; forse, se una tribù ha un numero infinito di membri, non verrà mai battuta da nessun'altra tribù. Ora entra però in campo la nuova, grande tribù i cui membri sono contrassegnati con tutte le possibili espansioni decimali dei numeri: la tribù dei numeri interi – 1, 2, 3, … – sarà in grado di tenerle testa? Potrei iniziare appaiando il membro numero 1 della tribù degli interi con il membro π = 3,1415926… di questa nuova tribù, quindi il membro numero 2 con e = 2,7182818… Ma come posso trovare un modo di esaurire tutti i membri della tribù dei numeri decimali illimitati? C'è un

metodo intelligente di disporre i numeri decimali illimitati in modo tale da poterli accoppiare con i numeri interi, come nel caso delle frazioni?

Cantor sviluppò un argomento ingegnoso per mostrare perché poteva essere sicuro che, per quanto mi sforzi di stabilire una corrispondenza con la tribù dei numeri interi, ci sarà sempre un membro della tribù dei decimali illimitati che rimarrà spaiato. L'infinità di tutte le espansioni decimali illimitate dei numeri è quindi una sorta di infinità realmente più grande dell'infinità dei numeri interi; a dimostrarlo è un'altra argomentazione, splendida nella sua semplicità, che penso porterei con me sull'isola deserta.

Come fa Cantor a essere sicuro di potermi sempre garantire che un membro della tribù dei decimali illimitati resterà spaiato? Prendiamo uno dei miei tentativi di stabilire una corrispondenza fra la tribù dei numeri interi e quella dei decimali illimitati.

1 ↔ 3,1415926…

2 ↔ 2,7182818…

3 ↔ 1,4142135…

4 ↔ 1,6180339…

5 ↔ 0,3331779…

…

Dato questo elenco, Cantor può procedere a costruire un numero con un'espansione decimale infinita che di sicuro non compare nella mia lista e che non è stato appaiato con nessuno dei numeri interi. Ogni cifra decimale è un numero compreso fra 0 e 9. Come prima cifra decimale del suo nuovo numero, Cantor ne sceglie una diversa dalla prima cifra decimale del numero appaiato con l'intero 1; come seconda cifra decimale, ne sceglie una diversa dalla seconda cifra decimale del numero appaiato con 2, e così via.

1 ↔ 3,1415926…

2 ↔ 2,7182818…

3 ↔ 1,4142135…

$$4 \leftrightarrow 1{,}6180339\ldots$$

$$5 \leftrightarrow 0{,}3331779\ldots$$

$$\ldots$$

Per esempio, il numero decimale illimitato che inizia con 0,22518… non è appaiato con i primi cinque numeri interi, in quanto si distingue dai primi cinque decimali illimitati presenti nella mia lista. In questo modo, Cantor può individuare un membro della tribù dei decimali illimitati che non è stato appaiato con nessun numero intero. E se io dicessi che è stato associato, mettiamo, al numero 101, Cantor potrebbe semplicemente ribattere: «Controlla la 101ª cifra decimale del tuo numero, e vedrai che è diversa dalla 101ª cifra decimale di questo mio nuovo numero».

Ci sono alcuni punti tecnici a cui fare attenzione. Per esempio, dovremmo evitare di usare il numero 0,9999… in quanto, come suggeriva la nostra barzelletta «quanti matematici ci vogliono per cambiare una lampadina?», questo numero coincide di fatto con 1,000… Ma l'essenza dell'argomentazione basta a mostrare che i numeri con un'espansione decimale illimitata sono di fatto più numerosi dei numeri interi.

Potreste obiettare che potrei limitarmi ad aggiungere questo nuovo numero alla mia lista e scalare tutti gli altri di una posizione; tuttavia, per quanti numeri io aggiunga al mio elenco, Cantor sarà sempre in grado di rifare lo stesso gioco e trovare un nuovo numero decimale illimitato che mi è sfuggito. Il punto è che l'argomento funziona per ogni possibile tentativo di appaiare i numeri interi con i numeri decimali illimitati: qualunque sia il mio elenco, ci saranno sempre dei numeri decimali illimitati rimasti fuori. Questa argomentazione ricorda un po' la scoperta, da parte di Gödel, che non possiamo aggiungere le asserzioni vere indimostrabili agli assiomi della matematica nella speranza che, alla fine, tutte le asserzioni vere divengano dimostrabili: ci saranno sempre delle verità non dimostrabili rimaste fuori. Di fatto, per dimostrare il suo teorema di incompletezza Gödel usò proprio un trucco simile a quello adottato da Cantor.

Lo stesso Cantor era sinceramente sorpreso dalle sue scoperte sull'infinito: «Lo vedo, ma non ci credo» diceva.

Dato che c'era più di un tipo di infinito, il simbolo ∞ introdotto da Wallis non bastava più. In effetti, le idee di Cantor hanno dimostrato che ci sono infiniti tipi di infinito, per i quali potremmo sostituire l'espressione «un mucchio» con dei nomi significativi. Lui stesso ha introdotto nuovi simboli per questi nuovi numeri infiniti usando le lettere dell'alfabeto ebraico. L'infinito più piccolo, $\aleph_0$ (aleph con zero), prende il nome dalla prima lettera dell'alfabeto ebraico; Cantor era probabilmente consapevole del suo significato mistico nella Cabala ebraica, dove rappresenta l'infinità di Dio, ma ai suoi occhi la scelta alludeva anche all'idea di un nuovo inizio, il principio di una nuova matematica. Per me, questo è uno dei momenti più eccitanti nella storia della matematica: è come quando abbiamo contato per la prima volta, solo che in questo caso, anziché 1, 2, 3, stavamo contando gli infiniti.

Il grande matematico tedesco David Hilbert si rese conto che Cantor stava creando una matematica davvero nuova e dichiarò che le sue idee sugli infiniti erano «il prodotto più strabiliante del pensiero matematico, una delle realizzazioni più belle dell'attività umana nel campo del puramente intelligibile […] nessuno ci scaccerà dal paradiso che Cantor ha creato per noi». Penso proprio di poter sottoscrivere questo giudizio.

Cantor era convinto di attingere alla mente divina: credeva che la matematica che stava facendo non fosse la sua e di essere soltanto un portavoce di Dio. Può darsi che la sua fede in qualcosa di trascendente gli abbia dato il coraggio di credere che anche l'infinito esistesse realmente; tuttavia, fu il suo genio matematico a addomesticare l'infinito portandolo dal regno dell'ignoto a quello delle cose conosciute. E la Chiesa cristiana, lungi dall'essere disturbata dai tentativi di Cantor di leggere la mente infinita di Dio, prese un attivo interesse per le idee emergenti: Cantor entrò così in un lungo rapporto epistolare con diversi ecclesiastici sulla natura di Dio e dell'infinito.

Non tutti, però, erano così innamorati delle sue idee. In particolare, uno dei più influenti matematici tedeschi, Leopold Kronecker, pensava che la matematica di Cantor fosse un'aberrazione e lo descriveva come un corruttore dei giovani:

> Non so che cosa sia predominante nella teoria di Cantor, se la filosofia oppure la teologia, ma sono sicuro che non c'è matematica.

Kronecker è famoso per la sua frase secondo cui «Dio ha creato gli interi. Tutto il resto è opera dell'uomo»; ma ciò che Cantor aveva creato era talmente rivoluzionario da rappresentare ai suoi occhi una sorta di carbonchio matematico. A causa dell'opposizione di Kronecker, Cantor non ottenne mai un incarico presso una delle grandi università (tra cui Berlino, dove insegnava Kronecker), ma trascorse i suoi giorni nel mortorio dell'Università di Halle. Cantor tentò di reagire, scrivendo direttamente al ministro dell'Educazione riguardo al comportamento di Kronecker; ma, probabilmente, alienarsi uno dei membri chiave della comunità matematica non era una buona idea.

Anche la pubblicazione delle sue idee si rivelò difficile. Un altro influente matematico dell'epoca, Gösta Mittag-Leffler, respinse infine il lavoro di Cantor, dichiarando che era cent'anni più avanti del suo tempo. Cantor fu molto ferito da questo rifiuto da parte di un matematico per cui nutriva grande rispetto. Il continuo scontro con l'establishment, la sua lotta per comprendere i misteri dell'infinito e la scomparsa della madre, del fratello e quindi del figlio più piccolo lasciarono il segno. Cantor soffriva di crisi maniaco-depressive, e la controversia sulla sua matematica non fece altro che esacerbare le sue condizioni; venne infine ricoverato nella Nervenklinik di Halle, dove trascorse gran parte degli ultimi decenni della sua vita. Deluso dalla matematica, si volse alle questioni religiose, oltre al tentativo di dimostrare che Francis Bacon era il vero autore delle opere teatrali di Shakespeare.

Sotto certi aspetti, però, la premonizione di Mittag-Leffler si rivelò corretta: a cento anni di distanza, le idee di Cantor sono considerate come alcune delle creazioni più belle e straordinarie prodotte negli ultimi tre secoli. Cantor ha consentito ai matematici di toccare l'infinito, di giocarci, di calcolare con l'infinito e, infine, di riconoscere che l'infinito è

un numero. Anzi, non solo un singolo numero, ma un numero infinito di numeri.

Ma per Cantor l'infinito non era soltanto un'idea della mente:

> Sono talmente a favore dell'infinito attuale che, invece di dire che la Natura lo aborre, come viene in genere affermato, sostengo che la Natura lo usa spesso ovunque, al fine di mostrare meglio le perfezioni del suo Autore. Credo pertanto che non ci sia nessuna parte della materia che non sia non dico divisibile, ma attualmente divisibile; e che, di conseguenza, la più piccola particella andrebbe considerata come un mondo pieno di un'infinità di creature differenti.

Ora lo vedi, adesso non lo vedi più

La scoperta, da parte di Cantor, di questi diversi strati di infinito condusse a un esempio molto concreto di un problema che non poteva essere risolto all'interno dei correnti assiomi della matematica: un'asserzione senza dimostrazione, indecidibile, al di là di ciò che possiamo conoscere. Era una questione che andava al cuore della natura del numero e mostrava quanto i numeri fossero di fatto sottili.

Cantor voleva sapere se esistono insiemi di numeri più grandi di quello dei numeri interi ma abbastanza piccoli da non poter essere appaiati con quello di tutte le espansioni decimali illimitate. In altre parole, può esistere una tribù i cui membri siano numerati con un insieme di numeri che batta la tribù dei numeri interi ma venga sconfitta da quella di tutti i numeri decimali illimitati? Il nome dato all'infinità di tutti i numeri decimali illimitati è il «continuo»; l'ipotesi del continuo, quindi, affermava che non c'era nessun infinito più piccolo del continuo ma più grande dell'infinità di tutti i numeri interi.

Hilbert rimase talmente colpito dalla sfida di dimostrare l'ipotesi del continuo che mise il problema di determinare se ci fosse un infinito intermedio in cima al suo elenco di 23 problemi per i matematici del XX secolo.

Cantor lottò per tutta la vita con questo problema. Un giorno si convinse di aver dimostrato che non c'era nessun infinito tra

questi due, ma poi trovò un errore. Il giorno dopo, pensò di aver dimostrato l'opposto, ossia che questo infinito intermedio di fatto esisteva. Cantor rimase sempre convinto che «in matematica, l'arte di porre le domande è più preziosa di quella di risolvere i problemi».

E, di fatto, le cose stavano proprio così. Cantor aveva incontrato tutte quelle difficoltà perché entrambe le risposte erano corrette.

La risposta a questo problema, che arrivò infine negli anni Sessanta, scosse la comunità matematica fino alle sue fondamenta. Partendo dal lavoro svolto da Gödel, il logico di Stanford Paul Cohen provò che è impossibile dimostrare, sulla base degli assiomi che attualmente usiamo in matematica, se esiste o meno un insieme di numeri la cui grandezza sia strettamente compresa tra il numero dei numeri interi e quello di tutti i numeri decimali illimitati. Di fatto, Cohen presentò due diversi modelli di numeri che soddisfacevano gli assiomi da noi usati per la matematica: in un modello, la risposta alla domanda di Cantor era sì, nell'altro era no.

Non sono sicuro se a Cantor sarebbe piaciuta questa conclusione: una volta dichiarò che «l'essenza della matematica sta interamente nella sua libertà», ma qui la libertà non era un po' troppa? Il risultato di Cohen significava che c'erano diversi tipi di matematica, non solo uno!

Qualcuno ha paragonato questo momento a quello in cui i matematici scoprirono che c'erano molti tipi di geometria oltre a quella di Euclide. La geometria euclidea soddisfa il postulato delle parallele, mentre le nuove geometrie sferica e iperbolica no. Oggi abbiamo compreso che ci sono diversi modelli per i nostri numeri, alcuni dei quali hanno questi infiniti intermedi mentre altri no.

Detto questo, per molti matematici si trattava comunque di un risultato sconvolgente. Pensavamo di conoscere i nostri numeri. I numeri come la radice quadrata di 2 e π potranno anche essere irrazionali, con espansioni decimali illimitate, ma sentiamo che li potremmo vedere segnati su un righello. Così, nel caso dei numeri che pensiamo di conoscere, sentiamo che ci dovrebbe essere una risposta al problema di Cantor. Esiste

un sottoinsieme di numeri, su questo righello, che sia strettamente più grande dell'insieme dei numeri interi ma strettamente più piccolo di quello di tutti i numeri decimali illimitati? La maggior parte dei matematici crede che la risposta dovrebbe essere sì oppure no, ma non sì e no; tuttavia, ci troviamo davanti a una dimostrazione che stabilisce che non possiamo dimostrare se le cose stanno in un modo oppure nell'altro.

Una collega di Cohen, Julia Robinson, gli scrisse: «Per l'amor del cielo, c'è soltanto un'unica vera teoria dei numeri! È la mia religione». È intrigante notare come, prima di spedire la lettera, la Robinson abbia cancellato l'ultima frase con una riga. Ma Cantor, probabilmente, non avrebbe avuto nessun problema davanti a questa incertezza, in quanto la sua religione lo incoraggiava ad accettare le cose che trascendono la conoscenza umana.

Quanti altri problemi irrisolti che compaiono sui libri di matematica si riveleranno indimostrabili? Per affrontarne alcuni e farli diventare dimostrabili, potremmo dover aggiungere nuovi assiomi. Gödel pensava che ciò potesse spiegare la difficoltà di dimostrare l'ipotesi di Riemann, il più grande problema irrisolto della matematica. Si chiedeva se i nostri attuali assiomi fossero sufficienti ad affrontare molti dei problemi della teoria dei numeri:

> Ci troviamo di fronte a un'infinita serie di assiomi che può essere estesa sempre di più, senza che si possa scorgere una fine […]. È vero che nella matematica di oggi i livelli più alti di questa gerarchia non vengono in pratica mai usati […] non è del tutto improbabile che questo carattere della matematica odierna possa avere qualcosa a che fare con la sua incapacità di dimostrare certi teoremi fondamentali, come per esempio l'ipotesi di Riemann.

Sì e no

Il teorema di incompletezza di Gödel è un affascinante microcosmo della sfida di tentare di dimostrare che cosa è vero. All'interno di qualunque sistema assiomatico coerente per la teoria dei numeri, ci saranno sempre cose vere ma che non possono essere dimostrate tali. L'aspetto intrigante è che,

lavorando all'esterno del sistema, possiamo anche dimostrare che una particolare asserzione è vera ma indimostrabile all'interno di quel sistema. Forse a questo punto vi chiederete: e perché, allora, non lavorare in quella cornice più ampia? La risposta è che Gödel ci garantisce che anche quel sistema più ampio avrà le proprie asserzioni vere indimostrabili, che ci richiederanno di spostarci di nuovo in un sistema ancora più ampio. È l'immagine familiare di un regresso all'infinito.

Ci sono risonanze con molti dei problemi fin qui affrontati. Forse è impossibile comprendere l'universo quando facciamo parte del sistema: se il sistema dell'universo è descritto da una funzione d'onda quantistica, per osservarlo non bisognerebbe trovarsi al suo esterno? La teoria del caos implica che non possiamo comprendere una parte del sistema come un problema isolato, in quanto un elettrone all'altro capo dell'universo potrebbe esercitare un'influenza tale da mandare un sistema caotico in una direzione del tutto differente; anche in questo caso, dobbiamo stare all'esterno per considerare l'intero sistema. Lo stesso problema si applica anche alla questione della comprensione della coscienza: siamo bloccati dentro le nostre teste, all'interno dei nostri sistemi, incapaci di accedere alle coscienze degli altri. Questo è anche il motivo per cui c'è chi sostiene che saremo sempre limitati nella nostra capacità di affrontare il problema dell'esistenza di un Dio che trascende l'universo in cui siamo rinchiusi.

L'altro importante aspetto dell'opera di Gödel è che non possiamo dimostrare, all'interno della cornice assiomatica per la teoria dei numeri, che tale teoria è coerente, ossia che non contiene contraddizioni. Ciò si può applicare al problema di stabilire se i metodi che adottiamo per acquisire le nostre conoscenze sull'universo siano validi: ogni tentativo di spiegare, per esempio, perché l'induzione è la strategia giusta per studiare i fenomeni fisici dovrà a sua volta basarsi sull'applicazione dell'induzione. Il tutto diventa molto circolare.

Le implicazioni per quanto riguarda i limiti del metodo matematico non sono tutte negative. Possiamo infatti dire che ci ha condotti all'eccitante scoperta che ci sono asserzioni sui numeri di cui possiamo assumere la verità oppure la falsità, ed

entrambe le risposte derivano da modelli di matematica legittimi; in altre parole, ci sono molti tipi diversi di matematica. Possiamo fare la stessa cosa quando incontriamo un problema davvero inconoscibile riguardo all'universo? Se identifichiamo un problema di cui è impossibile conoscere la risposta, ha perfettamente senso lavorare sotto l'ipotesi che la risposta sia una cosa oppure un'altra. La nostra scelta dell'ipotesi di lavoro potrebbe in parte dipendere dalla probabilità che la risposta corretta sia l'una piuttosto che l'altra; a volte, però, le probabilità non sono rilevanti, e la nostra scelta potrebbe basarsi sulla nostra valutazione personale delle conseguenze di lavorare all'interno di quel determinato sistema.

In matematica siamo liberi da questa necessità di scegliere. Come matematico, sono più che contento di muovermi tra modelli matematici differenti che presi individualmente sono coerenti ma si contraddicono a vicenda. Per esempio, posso fare matematica presupponendo che l'ipotesi del continuo sia vera oppure che sia falsa. Se il modello originale è coerente, entrambi i modelli matematici lo sono a loro volta. Se ciò fa funzionare la mia matematica, posso adoperare l'ipotesi del continuo per esplorare questo particolare universo matematico. Possiamo comportarci allo stesso modo con altri inconoscibili? Se Dio è ciò che è inconoscibile, possiamo fare una scelta che dia carne a questo ignoto? Ma facendo questo non stiamo tentando di renderlo conoscibile, andando così contro lo spirito della definizione?

Dobbiamo stare attenti quando facciamo delle scelte o presupponiamo ipotesi in base alle quali operare. Non possiamo semplicemente ipotizzare che qualcosa che non conosciamo possa essere vero oppure falso: prima di tutto, infatti, va dimostrato che entrambe queste possibilità siano coerenti. Per esempio, io non so se l'ipotesi di Riemann sui numeri primi sia vera o falsa, ma solo una di queste due possibilità è coerente con la nostra teoria dei numeri. Se dovesse emergere che è indimostrabile all'interno degli attuali assiomi della teoria dei numeri, ciò implicherebbe di fatto la sua verità; se fosse falsa, la sua falsità sarebbe infatti dimostrabile, in quanto saremmo in grado di trovare un

controesempio attraverso una ricerca sistematica finita. Se è falsa, non possiamo lavorare all'interno di un modello dei numeri dove assumiamo che sia vera, in quanto verremmo a produrre delle contraddizioni. È proprio questo, dal canto opposto, l'aspetto sorprendente dell'ipotesi del continuo: tanto questa ipotesi quanto la sua negazione possono essere integrate in una teoria coerente senza produrre contraddizioni.

Secondo alcuni, i numeri che stiamo cercando di catturare assiomaticamente dovrebbero essere quelli con cui misuriamo, i numeri che si trovano da qualche parte su un righello; pertanto, ci potrebbe essere una buona ragione per adottare l'ipotesi del continuo come una migliore descrizione di quello che stiamo cercando di modellare. In realtà, il logico Hugh Woodin ha di recente presentato argomentazioni in cui spiega perché i numeri che stiamo tentando di modellare sono quelli in cui l'ipotesi del continuo è falsa. Woodin sostiene che, se questi numeri modellano le misure che troviamo su un righello, ne segue che c'è motivo di credere che ciò implicherebbe l'esistenza di infiniti sottoinsiemi di grandezza intermedia tra l'insieme dei numeri interi e quello dei decimali illimitati.

Ciò illustra la tensione tra matematica e fisica. La matematica vive da secoli appagata con il suo multiverso matematico: modelli differenti, reciprocamente incompatibili, della geometria o della teoria dei numeri. In fisica, invece, anche se i fisici sono appagati dall'idea del multiverso, c'è ancora il desiderio di identificare quale di queste possibilità descriva l'universo di cui facciamo parte.

Supponiamo che uno scienziato elabori una teoria logica perfettamente coerente del possibile funzionamento dell'universo, ma che venga poi a scoprire che questa teoria non corrisponde ai dati sperimentali relativi al nostro universo: la teoria ipotetica viene scartata e non è più di nessun interesse per il mondo scientifico. Se un biologo inizia a scrivere articoli su un ipotetico animale che potrebbe potenzialmente esistere, come un unicorno, ma che di fatto non cammina su questa Terra, nessuno sarà interessato alla sua teoria, a meno che non getti qualche luce sugli animali che esistono nella realtà. Per contro, nella matematica questi nuovi mondi e questi ipotetici

animali vengono accolti a braccia aperte ed entrano a far parte di un ricco arazzo di possibilità matematiche. La scienza si occupa del reale, la matematica del possibile; la scienza traccia un singolo sentiero attraverso una molteplicità di possibili universi, la matematica mappa ogni percorso possibile.

Ma come ci dobbiamo comportare riguardo a un problema scientifico insolubile? Nel caso dell'ipotesi del continuo, non ha senso fare appello, nella scelta fra un'ipotesi e l'altra, a considerazioni di carattere probabilistico: non si tratta di chiedersi se una sia vera oppure no. Ma vale lo stesso anche per gli inconoscibili in fisica, dove abbiamo una «verità»?

È interessante notare che, nel caso della fisica, quando abbiamo un problema che trascende la nostra conoscenza, una risposta sarà comunque una descrizione corretta del nostro universo e l'altra no. Tuttavia, se il problema è davvero irrisolvibile, ciò significa che non otterremo mai nessuna nuova evidenza riguardo al nostro universo che ci consenta di decidere qual è la descrizione vera e quale quella falsa; se dovessimo trovare tali evidenze, infatti, significherebbe che il problema non era affatto irrisolvibile. Quindi, che cosa succede a chi lavora sotto l'ipotesi falsa? Niente! Come nel caso dell'ipotesi del continuo, la negazione dell'ipotesi vera sarà comunque coerente con la nostra attuale teoria dell'universo. Avremo un'interpretazione differente, con diversi teoremi e risultati; se dovesse portare a qualche contraddizione, ciò ci darebbe un modo per sapere che era sbagliata e che, di conseguenza, non si trattava di un problema davvero irrisolvibile.

Per esempio, consideriamo il problema di stabilire se l'universo sia infinito. Se è qualcosa di inconoscibile, lo è o perché l'universo è infinito, o perché, pur essendo finito, è di una grandezza tale che rimarrà per sempre oltre il nostro orizzonte degli eventi (e, quindi, al di là della portata delle nostre indagini). Supponendo che l'universo sia infinito, che cosa succederebbe a chi lavora sotto l'ipotesi che è finito ma troppo grande perché sia mai possibile dimostrare la sua finitezza? La cosa interessante è che se questa ipotesi portasse a dei problemi – se contraddicesse l'attuale teoria o qualche nuovo dato – avremmo un modo di dimostrare che l'universo è

infinito; di conseguenza, il nostro problema non sarebbe stato davvero irrisolvibile. Certo, in matematica questo è un ottimo modo di procedere per dimostrare le idee relative all'infinito. Abbiamo dimostrato che la radice quadrata di 2 non può essere espressa da un rapporto fra due numeri finiti partendo dall'ipotesi che ciò fosse possibile e finendo per cadere in una contraddizione. È possibile che un universo infinito sia l'unica assunzione che non conduca a contraddizioni; forse la matematica è anche in questo caso il nostro strumento migliore per esplorare gli estremi confini dell'universo.

In questo Confine abbiamo esplorato il modo in cui la matematica è riuscita ad aiutarci a districarci nell'infinito. È sorprendente notare che, un tempo, l'infinito era considerato come qualcosa che trascendeva la conoscenza ed era spesso collegato all'idea di Dio. Cartesio scrisse che «Dio è l'unica cosa che concepisco positivamente come infinita». E tuttavia, alla fine dell'Ottocento le straordinarie intuizioni di Cantor ci hanno fornito un modo per esplorare e confrontare gli infiniti. L'infinito non è più al di là della nostra portata. Cantor non era toccato dalle implicazioni del suo studio dell'infinito per quanto riguardava la questione di Dio; di fatto, anzi, credeva che Dio stesso lo avesse scelto per rivelare al mondo queste idee sull'infinito.

L'infinito ha giocato un ruolo chiave nell'esplorazione dell'esistenza di Dio. Per esempio, nella sua dimostrazione dell'esistenza di Dio nota come l'argomento cosmologico, Tommaso d'Aquino afferma che tutto ciò che esiste necessita di un creatore; ma questo principio verrebbe quindi ad applicarsi anche al creatore stesso. Per evitare il regresso all'infinito, Dio viene allora introdotto come la soluzione al problema di una causa prima. La matematica ci consente però di continuare a costruire nuovi infiniti considerando tutti i vecchi infiniti e prendendo quindi la loro unione, così che non c'è nessun bisogno di interrompere questa catena di creatori, come credeva invece l'Aquinate. Ogni volta otteniamo qualcosa di nuovo, e il processo non finisce mai.

Anche se la matematica continua a costruire nuovi infiniti partendo da quelli vecchi, diventa comunque molto difficile, persino per un matematico, afferrare l'estensione del nostro

universo matematico. La maggior parte dei matematici si accontenta di giocare nei livelli più bassi dell'infinito, ma sappiamo che questi livelli sono soltanto una parte di un'interminabile gerarchia. Questo dà qualche problema a coloro che tentano di definire Dio come «ciò di cui non si può pensare nulla di più grande»: in un certo senso, una cosa del genere non esiste, perché c'è sempre un modo di pensare qualcosa di più grande. Ma se ritorniamo all'idea di qualcosa al di là di ciò che gli esseri umani possono concepire, siamo tornati alle cose che noi, come esseri umani, non possiamo conoscere: le limitazioni alla conoscenza imposte dalla nostra biologia.

Ciò che non possiamo conoscere

Così, alla fine del mio viaggio ai confini della conoscenza, posso dire di aver trovato cose di cui è possibile affermare categoricamente l'inconoscibilità? I problemi che ritenevo irrisolvibili, come quello di stabilire se l'universo sia infinito, si sono rivelati meno inattaccabili di quanto credessi. Possiamo usare la matematica per dimostrare, attraverso mezzi finiti, l'esistenza dell'infinito; così, anche se forse non potremo mai esplorare o vedere lo spazio oltre la bolla finita che racchiude l'universo a cui abbiamo fisicamente accesso, potremmo comunque arrivare a conoscere, attraverso il solo potere delle nostre menti, quello che c'è al di là.

La comprensione della natura del tempo prima del Big Bang era un altro confine che ritenevo inattaccabile, ma anche in quel muro si sono aperte delle fessure: i recenti progressi scientifici ci hanno infatti fornito dei modi per teorizzare l'esistenza di un tempo precedente a quello che pensavamo fosse l'inizio di tutto (e forse addirittura raccoglierne le prove). Ciononostante, il problema di stabilire se il tempo abbia avuto un inizio o se si estenda all'infinito nel passato pare destinato a rimanere sui libri scientifici ancora a lungo.

Dal canto opposto, l'infinitamente piccolo che si trova al cuore del dado che tengo in mano sembra qualcosa che rimarrà

per sempre al di là di una conoscenza completa. Ogni generazione ha pensato di aver raggiunto l'indivisibile, per poi scoprire che la materia era composta da parti ancora più piccole. Come potremo mai sapere che gli attuali elementi costitutivi dell'universo – quark, elettroni, neutrini – non siano a loro volta divisibili, come tutte le altre particelle incontrate via via sbucciando la cipolla della realtà? Di fatto, oggi la fisica quantistica pone un limite alla profondità a cui potremo spingerci nella nostra indagine sui componenti ultimi della materia: non potremo mai indagare degli oggetti più piccoli della lunghezza di Planck. C'è quindi un confine oltre il quale non possiamo spingerci.

La nostra possibilità di conoscere qualcosa riguardo a quel confine che costituisce la nostra coscienza è una questione tuttora in uno stato di flusso. Questa sfida svanirà come confine perché scopriremo che, in realtà, si tratta di un interrogativo mal posto? Oppure troveremo una risposta adottando una strategia simile a quella usata dagli scienziati per identificare l'essenza della vita? Non c'era alcun *élan vital*, ma solo una serie di processi biologici grazie ai quali un insieme di molecole ha vita. O, ancora, il problema della coscienza rimarrà a noi inaccessibile, in quanto bloccati all'interno delle nostre coscienze e impossibilitati a entrare in quelle degli altri?

L'eventualità che la conoscenza ci sia preclusa perché siamo bloccati all'interno del sistema è un punto che accomuna molti dei problemi che ho cercato di affrontare. In matematica ci sono verità che rimarranno indimostrabili dentro un determinato sistema; una volta usciti potremo conoscerle, ma in questo modo verremo a creare un nuovo sistema che avrà a sua volta le proprie verità indimostrabili.

L'idea che un esperimento quantistico possa essere ripetuto è un'impossibilità, in quanto non siamo in grado di isolare l'esperimento dall'universo in cui viene condotto, perché sarà ormai cambiato e si sarà evoluto quando ci accingeremo a riprodurre l'esperimento.

Anche la matematica creata per comprendere il mio dado è in qualche modo una fantasia. Che cos'è la probabilità? Se

lancio il mio dado seicento volte, mi aspetto di ottenere cento 6; io, però, voglio lanciarlo una volta sola e sapere qualcosa su come cadrà. Le equazioni della teoria del caos ci dicono che gran parte del futuro dipende da una regolazione finissima delle cifre decimali che controllano l'input delle equazioni; così, non posso neppure avere una conoscenza del presente sufficientemente completa da darmi qualche chance di conoscere il futuro o il passato.

Le limitazioni fisiche del cervello umano – o anche della capacità di calcolo dell'universo stesso – pongono dei vincoli alla quantità di cose che potremo mai conoscere: ci sarà sempre qualcosa al di là della nostra conoscenza. Questa, comunque, non è un'inconoscibilità assoluta, ma piuttosto una situazione simile a quella della luce proveniente dagli estremi confini dell'universo (almeno prima che comprendessimo che l'espansione di quest'ultimo sta accelerando): dobbiamo solo aspettare abbastanza a lungo e la luce arriverà. Allo stesso modo, aspettiamo abbastanza a lungo e un computer potrà farsi strada attraverso tutte le verità dimostrabili della matematica. Sì, ma se il tempo stesso – come ha rivelato la mia esplorazione dei suoi confini – dovesse finire mentre stiamo ancora aspettando?

Le limitazioni del linguaggio sono al cuore di molti dei limiti della conoscenza, e potrebbero evolversi e cambiare. Senza dubbio, molti filosofi identificano il linguaggio come un problema riguardo alla coscienza. La comprensione della fisica quantistica è così difficile proprio perché l'unico linguaggio che ci aiuta a districarci tra le sue idee è la matematica: provate a tradurre la matematica nel linguaggio dell'esperienza quotidiana, e otterrete quelle assurdità che rendono la fisica quantistica così problematica. Pertanto, l'inconoscibilità della posizione e della quantità di moto non è in realtà un vero e proprio inconoscibile; piuttosto, è il frutto dell'inadeguatezza della traduzione dei concetti matematici nel linguaggio naturale.

Dobbiamo poi riconoscere di essere vincolati dai modi di pensare del nostro momento storico. Comte riteneva che non avremmo mai potuto conoscere la composizione di una stella, ma quanto si sbagliava! Mi chiedo quindi se la cosa più sicura

non sia dire che non potremo mai sapere con certezza quali sono le cose che non possiamo conoscere.

Dio è un numero immaginario?

Fin dove possiamo arrivare creando soluzioni per problemi apparentemente insolubili? Per molti secoli, i matematici avevano creduto che l'equazione $x^2 = -1$ non avesse soluzione. Poi, però, venne adottato un approccio più immaginativo: creiamo una soluzione per questa equazione. Così abbiamo introdotto nel panorama della matematica i numeri immaginari, definendo i come il numero il cui quadrato è -1. Perché questo approccio funziona? Perché non viene a produrre contraddizioni all'interno della teoria. Abbiamo integrato questo concetto con la matematica che già conoscevamo e abbiamo iniziato a conoscere i. E la cosa più importante è che, così facendo, abbiamo avuto accesso a nuove parti eccitanti del mondo matematico: se non avessimo ammesso i numeri immaginari nella matematica, ne avremmo limitato estensione e potere. La cosa fondamentale, però, è che non bisogna attribuire al concetto più proprietà di quelle che di fatto possiede.

Che cosa succederebbe se tentassi un approccio creativo con qualcuna delle nostre questioni inconoscibili? Se, per esempio, definissi Dio come la soluzione al problema «Perché esiste qualcosa anziché nulla?»? Tale concetto di Dio non vuole essere nulla di più che la risposta a questa particolare domanda, come afferma la sua definizione; non ha altre proprietà. È questo sconosciuto fino a tal punto. Anche se dovessimo scoprire altro riguardo alla soluzione di quel problema, ciò significherà soltanto che conosceremo qualcosa di più su questo Dio che è definito come la risposta a «Perché esiste qualcosa anziché nulla?».

Occorre essere cauti con un approccio del genere. Il semplice fatto di poter scrivere un'equazione matematica non significa che abbia delle soluzioni. L'ammissione di un nuovo concetto che risolve l'equazione $x^2 = -1$ è stata proficua, in

quanto ci ha dato accesso a nuove parti consistenti della matematica. Per un platonico, questa idea esisteva da sempre e attendeva solo di essere articolata; per altri, è stata il frutto di un atto creativo che ha arricchito il nostro mondo matematico. Se però io scrivo le equazioni per l'ultimo teorema di Fermat e tento di definire dei nuovi numeri che le risolvano, mi ritroverò con delle asserzioni contraddittorie; in fin dei conti, è proprio in questo modo che Wiles ha dimostrato che tali equazioni non possono essere risolte.

Il problema della maggior parte delle religioni è che il Dio che ci propinano ha molte proprietà che non hanno nulla a che fare con quella definizione. È come se dovessimo procedere a ritroso, concentrandoci sulle strane proprietà evocate nel corso delle generazioni senza poter avere una reale comprensione di quale fosse la definizione originale. Incontriamo questa immagine imbastardita da piccoli e quindi, quando ci poniamo la domanda «Perché esiste qualcosa anziché nulla?», non vediamo come possa funzionare come una risposta. Ma ci è stata mostrata la cosa sbagliata.

È per questo motivo che mi dichiaro ateo. Per me, significa rifiutare le soluzioni classiche che la religione sembra offrire riguardo a queste cose sconosciute. Forse, però, non dovrei rigettare tutto. Ci sono cose che rimarranno sempre sconosciute, quindi può darsi che quel Dio esista. L'argomento tradizionale contro il Dio dei vuoti – il «Dio tappabuchi» – è che noi dovremmo sforzarci di conoscere Dio, di avere una relazione personale con questo concetto; e questo Dio, definito come il trascendente o l'ignoto, preclude per sua stessa definizione la possibilità di conoscerlo.

Ma il problema di questa definizione di Dio è che non ci conduce molto lontano. Se la definizione di i come un numero il cui quadrato è -1 ha portato a una ricca serie di conseguenze, la definizione di qualcosa come la risposta a «Perché esiste qualcosa anziché nulla?» non dà origine a nulla di nuovo. Dobbiamo inventare per questa cosa proprietà che non scaturiscono dalla sua definizione. Come ha ben detto Karen Armstrong, questo Dio altissimo sta troppo in alto rispetto a noi.

Ci sono diversi modi di reagire di fronte all'identificazione dell'inconoscibile. Uno è quello di lasciarlo così com'è: se è inconoscibile, significa che non può essere conosciuto. C'è però anche la tentazione di fare una scelta riguardo alla risposta e vivere quindi la propria vita in base a essa. Forse la reazione più coerente dal punto di vista logico è di mantenersi aperti a molteplici soluzioni e lasciare che tutte corrano parallele finché qualche nuova idea non provoca il collasso delle possibilità. I matematici, per esempio, sono felici di esplorare una matematica in cui l'ipotesi del continuo è vera, ma sono altrettanto a loro agio con una matematica parallela dove si presume che tale ipotesi sia falsa.

Mi chiedo comunque se, giunto al termine della mia esplorazione dei limiti della conoscenza, non abbia cambiato opinione sul fatto di dichiararmi ateo. Data la mia definizione di un Dio come l'esistenza delle cose che non possiamo conoscere, dichiararmi ateo significherebbe credere che non c'è nulla che non possiamo conoscere; ma questa è una cosa a cui non credo più. In un certo senso, penso di aver dimostrato che questo Dio esiste; si tratta ora di esplorare che qualità possiede.

In realtà, la mia professione di ateismo è solo una risposta alle versioni piuttosto impoverite di Dio che ci vengono offerte dalla maggior parte delle religioni e delle culture. Io respingo l'esistenza di un'intelligenza soprannaturale che interviene nell'evoluzione dell'universo; il mio è un rifiuto di quel Dio a cui le persone assegnano strane proprietà (come la compassione, la saggezza, l'amore), che non hanno nessun senso in relazione all'idea che sto esplorando.

È probabile che una posizione e una definizione del genere non soddisfino nessuno dei due schieramenti: i militanti atei non vogliono ammettere nel dibattito nulla che porti il nome di Dio, mentre i credenti criticheranno il mio concetto di Dio come l'ignoto ritenendolo un'idea priva di forza che non coglie il nocciolo della questione. Quindi, come dobbiamo comportarci con questo Dio dei vuoti?

Forse la lezione importante è quella che ci dice di mantenere uno stato mentale schizofrenico, la capacità di

pensare in molteplici modi. Da un lato, come esseri umani dobbiamo ammettere di non poter conoscere tutto. La conoscenza ha dei limiti dimostrabili. Questo stato di umiltà è intellettualmente importante, o finiremo per vivere nell'illusione e nell'*hybris*. Tuttavia, l'altra lezione è che non possiamo ogni volta sapere che cosa trascenderà per sempre la nostra comprensione. Perciò, per uno scienziato, è fondamentale non arrendersi troppo presto: dobbiamo credere di poter trovare le risposte e forse conoscere tutto.

Possiedo un numero pari o dispari di dadi?

Il mio viaggio attraverso la scienza ha messo in luce diversi confini della conoscenza, ma c'è anche il problema epistemologico di base di stabilire se, di fatto, sia possibile conoscere qualcosa. Due millenni fa, Socrate dichiarava che «la vera conoscenza consiste nel sapere di non sapere»; il riconoscimento della nostra ignoranza è l'unica vera asserzione che possiamo fare riguardo alla nostra conoscenza.

I filosofi hanno scritto innumerevoli volumi sulla teoria della conoscenza, cercando di stabilire se possiamo conoscere qualcosa e tentando di definire ciò che intendiamo per conoscenza. Platone propose di definire la conoscenza come una «credenza vera giustificata», ma Bertrand Russell e quindi, negli anni Sessanta, il filosofo americano Edmund Gettier hanno messo in discussione il fatto che questa definizione riesca a catturare davvero il significato della conoscenza.

L'esempio classico proposto da Russell ci presenta una donna che guarda l'orologio che segna le due e crede che questa sia l'ora effettiva: la sua credenza sembra giustificata, in quanto l'orologio dice che l'ora è quella; inoltre, di fatto sono proprio le due, quindi la sua credenza è anche vera. Tuttavia, l'orologio si è fermato dodici ore prima, ed è solo per una coincidenza che la donna l'ha guardato dopo esattamente dodici ore.

Gettier ha formulato scenari simili per contestare il concetto di credenza vera giustificata. Guardando un campo, vediamo una cosa che crediamo essere una mucca e deduciamo quindi che nel campo c'è una mucca. Di fatto, nel campo c'è proprio una mucca, e quindi la nostra conclusione è vera, solo che non la possiamo vedere perché è dentro un avvallamento. Abbiamo quindi un'asserzione vera, basata su una credenza giustificata (in quanto la cosa che abbiamo visto nel campo assomigliava senza dubbio a una mucca); tuttavia, il fatto che la nostra asserzione sia vera e giustificata non implica che possediamo una conoscenza.

Possiamo immaginare una situazione in cui abbiamo trovato un'asserzione sull'universo che è di fatto vera; la sua giustificazione, però, è del tutto scorretta, anche se ci ha condotti a fare un'affermazione che risulta vera. Di certo, ciò non significa conoscere che l'asserzione è vera. Mi capita spesso di formulare delle dimostrazioni di asserzioni matematiche vere per poi scoprire che contengono un errore logico (che spero di individuare prima di presentarle a una rivista per la pubblicazione); in questi casi, la mia dimostrazione falsa non può realmente giustificare la mia conoscenza che quell'asserzione matematica è vera.

Non so se l'ipotesi di Riemann sia vera o falsa. Tuttavia, diverse persone hanno formulato quelle che credevano essere delle dimostrazioni della verità di questa ipotesi, scrivendo pagine e pagine di equazioni a sostegno della loro credenza. Nella maggior parte dei casi, viene scovato un errore e, quando quest'ultimo viene mostrato all'autore, quella credenza giustificata svanisce. Ma se la dimostrazione falsa riuscisse a convincere tutti? Supponiamo che l'errore sia molto sottile. Nonostante la nostra credenza giustificata, non possiamo dire di sapere che l'ipotesi di Riemann è vera. Senza dubbio, la giustificazione dev'essere vera per portare a una credenza vera giustificata.

Alcuni antichi astronomi avevano sostenuto che la Terra ruotava attorno al Sole, ma la giustificazione da loro addotta non era corretta. Nel VII secolo a.C., il filosofo indiano Yajnavalkya giustificò la sua fede in un sistema solare eliocentrico affermando che «il Sole tiene legati a sé questi

mondi – la Terra, i pianeti, l'atmosfera – attraverso un filo»; possiamo concludere che sapeva che la Terra ruota attorno al Sole?

Penso di essere d'accordo con il mio collega del New College, Timothy Williamson, il quale nel libro *Knowledge and Its Limits* afferma che la conoscenza dovrebbe essere considerata come qualcosa di fondamentale e non come una cosa definibile in termini di altre cose. Sembra sappiamo tutti che cosa significhi conoscere: è uno dei pochi termini – solo un centinaio circa – che hanno una traduzione equivalente in ogni lingua della Terra (il che non si può dire, per esempio, di una parola elementare come mangiare).

È grazie a Williamson che sono poi venuto a conoscenza di una fantastica trovata logica nota come il paradosso dell'inconoscibilità: a meno che non sappiate tutto, ci saranno sempre delle verità che rimarranno per loro natura inconoscibili. Questo paradosso è attribuito al logico americano Frederic Fitch, che lo pubblicò in un articolo del 1963; Fitch, però, ammise che la fonte originale era di fatto un commento scritto nel 1945 da un anonimo *referee* in relazione a un articolo che aveva in precedenza presentato per la pubblicazione ma non era mai stato dato alle stampe. Il suo nome è rimasto un mistero per molti anni, ma le ricerche hanno infine portato alla copia manoscritta della relazione e una perizia calligrafica lo ha identificato con il famoso logico americano Alonso Church, autore di importanti contributi per la comprensione del teorema di incompletezza di Gödel.

L'argomentazione di Church richiama un po' la strategia autoreferenziale impiegata da Gödel, ma in questo caso la matematica non è coinvolta: si tratta di pura logica. E se Gödel ha dimostrato che ci sono verità matematiche che non possono mai essere dimostrate all'interno di un particolare sistema assiomatico coerente, Church si è spinto oltre, promettendo una verità che non potrà mai essere conosciuta in nessun modo.

Supponiamo che ci siano asserzioni vere di cui io non conosco la verità. Di fatto, ci sono moltissime asserzioni di questo genere. Per esempio, la mia casa è piena di dadi: non

ho solo il dado da casinò che tengo sulla mia scrivania, ma ci sono anche i dadi del Monopoli, quelli del Ludo, quelli spariti dentro il divano, quelli sepolti nel caos delle stanze dei miei figli. Non so se la mia casa contenga un numero pari o dispari di dadi. In se stessa, questa non è un'asserzione inconoscibile, in quanto potrei passare al setaccio la mia casa per determinare la risposta; tuttavia, si tratta senz'altro di una domanda a cui, in questo preciso momento, non so come rispondere.

Ora, tenete duro: questa è la parte che mi fa girare la testa ogni volta che la leggo. Sia *p* l'asserzione vera tra le due opzioni «nella mia casa c'è un numero pari di dadi» e «nella mia casa c'è un numero dispari di dadi»; io non so quale sia vera, ma una delle due dev'esserlo per forza. A questo punto, dall'esistenza di questa verità ignota viene dedotta l'esistenza di una verità inconoscibile, costituita dalla seguente asserzione: «*p* è vera ma non è conosciuta». Questa asserzione è senza dubbio vera, ma perché è inconoscibile? Perché conoscerla significherebbe sapere che *p* è vera ma non è conosciuta, e questa sarebbe una contraddizione, in quanto *p* non può essere conosciuta e non conosciuta allo stesso tempo. Così, l'asserzione «*p* è vera ma non è conosciuta» è un'asserzione inconoscibile. Ciò non equivale a dire che *p* sia in se stessa inconoscibile: come ho già sottolineato, potrei perlustrare la mia casa alla ricerca di tutti i dadi e stabilire se il loro numero è pari o dispari. È la meta-asserzione «*p* è vera ma non è conosciuta» a essere inconoscibile. La dimostrazione funziona se esiste qualcosa che è vero ma non è conosciuto: l'unico modo per aggirarla sarebbe conoscere tutto. Tutte le verità sono conoscibili soltanto se tutte le verità sono conosciute.

Anche se è diventata nota come un paradosso, in questa dimostrazione, come sottolinea Williamson, non c'è nulla di paradossale: si tratta semplicemente di una prova dell'esistenza di verità inconoscibili. Dopo tutto il mio viaggiare ai confini della scienza, è emerso che basta un'ingegnosa argomentazione logica per aprire quella breccia nella conoscenza che stavo cercando.

Possiamo conoscere qualcosa?

Parecchi filosofi della conoscenza si chiedono quanto possiamo realmente conoscere su una qualsiasi cosa. Nel Settecento, il filosofo scozzese David Hume identificò uno dei problemi fondamentali che accomunano molte delle questioni qui affrontate: quello di essere rinchiusi all'interno del sistema. Se vogliamo applicare metodi scientifici per stabilire che conosciamo di fatto qualcosa, entriamo in un circolo vizioso, in quanto veniamo a usare degli argomenti scientifici e logici per dimostrare che questi metodi sono validi. È impossibile assumere una posizione esterna. Wittgenstein riassunse questo problema in termini alquanto coloriti dicendo «Non è possibile cagare più in alto del proprio culo».

E per quanto riguarda la matematica? Noi possediamo senz'altro conoscenze certe: per esempio, non abbiamo forse una dimostrazione che ci assicura al 100 per cento che esistono infiniti numeri primi? Tuttavia, anche le dimostrazioni matematiche, dove tutte le carte vengono messe in tavola, devono sempre essere elaborate dal cervello umano per controllare che tutto sia corretto. E se fossimo tutti convinti della verità di un'argomentazione in cui si cela però un sottile errore? Certo, una delle cose che ci tornano utili è il fatto che ogni errore fatale dovrebbe infine venire a galla. Ma ciò non implica allora che anche la matematica, così come la scienza, è soggetta a un processo evolutivo? Il filosofo Imre Lakatos era di questo parere e ha sviluppato una filosofia della matematica modellata sulla visione popperiana della scienza: anche la matematica, cioè, è una disciplina in cui possiamo dimostrare soltanto la falsità, non la verità. Per Lakatos, non è mai possibile sapere se una dimostrazione nasconde un sottile errore sfuggito a tutti.

Il suo libro *Dimostrazioni e confutazioni* presenta un affascinante dialogo tra alcuni studenti impegnati ad analizzare la dimostrazione del teorema di Eulero sul rapporto tra il numero di vertici (V), spigoli (S) e facce (F) di un poliedro tridimensionale. La loro discussione rispecchia la storia dell'evoluzione di questo teorema, che ci dice che $S = V + F -$

2. All’inizio, gli studenti pensano di aver raggiunto una dimostrazione, ma poi uno di loro presenta una figura con un buco nel mezzo per la quale la formula e la dimostrazione non funzionano. Secondo un’interpretazione, la dimostrazione si applica solo alle figure per le quali è stata pensata; poi, però, vengono introdotti un nuovo teorema e una nuova dimostrazione, con una nuova formula che, in aggiunta a vertici, spigoli e facce, tiene conto anche del numero di buchi presenti nella figura. Questa storia mette in luce un approccio alla conoscenza matematica assai più evolutivo di quanto molti matematici ammetterebbero, un approccio più vicino al processo della ricerca scientifica. Così, quanto possiamo considerare efficaci questi approcci nella scoperta della verità?

Una delle ragioni per credere che la scienza produca una vera conoscenza è il suo tasso di successo. La scienza registra talmente tanti successi nel descrivere e predire come sembrano stare le cose da darci l’impressione che si stia avvicinando a una realtà nella cui esistenza la maggior parte di noi credono. Il fatto che la scienza funzioni così bene nel fare predizioni e spiegare i fenomeni è forse la miglior misura che abbiamo per valutare quanto siamo vicini alla verità: se la mappa di cui ci serviamo ci porta regolarmente dove vogliamo andare, è un buon segno del fatto che quella mappa rappresenta con precisione la realtà.

La scienza ha mappato l’universo molto bene. Le sonde spaziali atterrano su pianeti remoti grazie alle nostre scoperte sulla natura della gravità. La terapia genetica ci aiuta ad affrontare patologie in precedenza intrattabili grazie alle nostre scoperte sulla biologia delle cellule. Troviamo la strada con il GPS sfruttando le nostre scoperte sul tempo e sullo spazio. Quando la nostra mappa scientifica non funziona, siamo pronti a ridisegnarne i contorni per trovare una descrizione che ci aiuti a districarci nel nostro ambiente. È la sopravvivenza della teoria più adatta: sopravvive quella teoria che può vantare un continuo successo nel fare predizioni e nel permetterci di controllare il nostro ambiente. Magari la scienza non rappresenterà davvero la realtà, ma non c’è nessuna alternativa che si avvicini di più a questo obiettivo.

Fin dai tempi di Kant, abbiamo dovuto lottare con l'inconoscibilità delle «cose in sé». I limiti della percezione umana, evidenziati dalla facilità con cui i nostri sensi possono venire ingannati, fanno sorgere diverse domande su quanto il nostro cervello sia davvero in grado di conoscere la realtà. Non è forse vero che vediamo tutto attraverso le lenti che indossiamo per guardare il nostro universo?

Uno dei problemi chiave del nostro tentativo di conoscere il mondo è che otteniamo la conoscenza del mondo che ci circonda attraverso i sensi e, quindi, prendiamo tale conoscenza e la estendiamo attraverso il ragionamento analitico. Formuliamo interpretazioni corrispondenti a tutte le informazioni raccolte con i sensi. Le invenzioni del telescopio, del microscopio e dello scanner fMRI hanno esteso la portata di ciò che possiamo percepire con i nostri sensi.

Ma se nell'universo ci fossero cose che i nostri sensi non possono rilevare? I nostri sensi sono più numerosi di quanto molte persone credano: oltre a vista, udito, gusto, tatto e olfatto, abbiamo anche un senso chiamato propriocezione, che ci rende consapevoli della posizione del nostro corpo nello spazio. Abbiamo anche sensi che ci informano sullo stato interno del nostro corpo. Il fluido contenuto nell'orecchio interno ci dice come la posizione del nostro corpo viene a cambiare in relazione alla gravità. Ma ci sono anche fenomeni fisici che ci sfuggono perché non abbiamo gli strumenti sensoriali per interagire con essi?

Considerate un organismo privo di occhi o neuroni per rilevare la luce. Se non ha modo di accedere alle onde elettromagnetiche, come potrà mai sviluppare una teoria dell'elettromagnetismo? Noi abbiamo ottenuto ottimi risultati combinando il nostro senso della vista, che coglie una parte dello spettro elettromagnetico, con l'analisi matematica, che ci ha permesso di dedurne le altre parti; quindi, abbiamo creato strumenti in grado di rilevare queste onde e convertirle in cose che possiamo interpretare. Ma come avremmo potuto iniziare se non fossimo stati in grado di accedere, attraverso il nostro senso della vista, a una parte di quello spettro?

È possibile che le limitazioni dei nostri sensi vengano a porre dei limiti anche alla matematica che possiamo conoscere. Anche se la matematica è tutta nella mente, una scuola di pensiero sostiene che, dato che la nostra intelligenza è in ultima analisi incarnata, le conoscenze che possiamo ottenere sulla matematica sono ristrette a ciò che può essere incarnato. È certo vero che la matematica che conosciamo ha spesso avuto origine dalle descrizioni del mondo fisico. Prendete i numeri immaginari: forse vi chiederete in che senso possiamo considerarli incarnati, eppure dobbiamo ammettere che sono emersi dall'atto di misurare le lunghezze nelle figure geometriche. È quest'atto di comprendere la diagonale che attraversa la faccia del mio dado cubico che ha portato i babilonesi a riflettere sulla radice quadrata di 2; e da lì, quindi, abbiamo iniziato quel viaggio che ci ha condotti all'idea della radice quadrata di –1.

Alcuni studiosi dell'intelligenza artificiale affermano che quest'ultima, per essere in grado di eguagliare la nostra, dovrà essere un'intelligenza fisicamente incarnata: in altri termini, un cervello che viva esclusivamente negli hard disk di un computer non può generare un'intelligenza come la nostra senza interagire con il mondo sul piano fisico, attraverso un corpo. Si tratta di un'ipotesi stimolante. È davvero possibile che ci siano parti del mondo matematico che ci restano precluse perché non traggono origine da concetti fisicamente incarnati?

E tuttavia, c'è anche la profonda questione filosofica di stabilire in che misura i nostri sensi ci consentano di conoscere qualcosa con certezza. Abbiamo già visto come i nostri sensi possono essere ingannati e indotti a credere delle cose che in realtà sono trucchi della mente. Come possiamo essere sicuri, per esempio, che l'universo che conosciamo non sia una simulazione? Come abbiamo visto nel Sesto Confine, possiamo indurre qualcuno a credere di trovarsi nel corpo di un'altra persona. Come possiamo quindi avere la certezza che non siamo soltanto dei cervelli contenuti in un vaso, con un computer che ci trasmette informazioni sensoriali artificiali, e che tutto il mondo che ci circonda non sia soltanto un trucco?

La mia risposta a questo tentativo di minare ogni nostra conoscenza consiste nel ribattere che questo libro ha cercato di esplorare in che modo possiamo conoscere qualcosa su tale simulazione. Kant credeva che le cose in sé – le cose come sono in realtà – rimarranno per sempre nascoste alla nostra vista: tutto quello che possiamo conoscere è l'apparenza delle cose. Penso che la maggior parte degli scienziati dedichino tempo a leggere libri su questo dibattito sull'ontologia e l'epistemologia e ad ascoltare i filosofi che si chiedono se la scienza ci dica realmente come stanno le cose. Quindi, tornano alla loro attività scientifica, dicendosi che se non potremo mai sapere com'è la realtà in se stessa, cerchiamo almeno di dire com'è la realtà che apprendiamo attraverso i nostri sensi; in fin dei conti, è quest'ultima ad avere un impatto su di noi.

Così, forse, il meglio che possiamo sperare è che la scienza ci dia una conoscenza verosimile dell'universo: ossia, che ci presenti una narrazione che sembri descrivere la realtà. Noi crediamo che una teoria che rende intelligibile la nostra esperienza del mondo è una teoria che si avvicina alla vera natura del mondo, benché secondo i filosofi non lo sapremo mai. Come dichiarò Niels Bohr: «È sbagliato pensare che il compito della fisica consista nello scoprire com'è la natura. La fisica si occupa di quello che possiamo dire sulla natura».

Hic sunt dracones

Ma per quanto riguarda le cose che non possiamo conoscere? Se una cosa è al di là dell'indagine scientifica, se è inconoscibile, forse c'è qualche altra disciplina che ci permette di afferrarla meglio? Martin Rees riflette sulla domanda «Perché c'è qualcosa anziché nulla?» nei seguenti termini: «Il mistero più grande è perché esiste qualcosa. Che cos'è che ha soffiato la vita nelle equazioni e le ha attualizzate in un cosmo reale? Queste domande trascendono comunque la scienza: sono il campo di filosofi e teologi».

Forse questo significa arrendersi troppo presto, ma è senz'altro vero che la scienza fiorisce quando condividiamo

l’inconoscibile con altre discipline. Se l’inconoscibile ha un impatto sul modo in cui conduciamo le nostre vite, vale allora la pena di avere dei modi alternativi di sondare le conseguenze della scelta di rispondere in un certo modo a uno di questi enigmi. La musica, la poesia, la narrativa e l’arte sono voci potenti per esplorare le implicazioni dell’inconoscibile.

Prendiamo il problema di stabilire se l’universo sia infinito. Ci sono interessanti conseguenze per chi sceglie di credere che lo spazio si estenda senza fine: il fatto che nell’universo ci possa essere un infinito numero di vostre copie che stanno leggendo questo libro potrebbe avere un effetto profondo sul modo in cui vivete la vostra vita, anche se non saprete mai se le cose stanno davvero così.

La teoria del caos implica che anche gli esseri umani – e non solo il mio dado da casinò – fanno parte, sotto certi aspetti, dell’inconoscibile. Anche se siamo dei sistemi fisici, nessuna quantità di dati ci potrà mai aiutare a predire completamente il comportamento umano; le discipline umanistiche, quindi, sono il linguaggio migliore che abbiamo per comprendere il più possibile che cosa significa essere umani.

Gli studi sulla coscienza suggeriscono confini oltre i quali non possiamo andare. I nostri mondi interiori sono potenzialmente inconoscibili per gli altri. Ma, in fondo, non è proprio questo uno dei motivi per cui leggiamo e scriviamo romanzi? È il modo più efficace per consentire agli altri di accedere a questo mondo.

Ciò che non possiamo conoscere crea lo spazio per i miti, le storie e l’immaginazione, oltre che per la scienza. Anche se non conosciamo qualcosa, ciò non ci impedisce di ideare delle storie per riempire questo vuoto, ed esse hanno un’importanza cruciale nel fornirci i materiali per ciò che un giorno potrebbe diventare conosciuto. Senza storie, non avremmo una scienza.

Wittgenstein concluse il suo *Tractatus logico-philosophicus* con la celebre frase: «Su ciò di cui non si può parlare, si deve tacere». Penso che sia una posizione disfattista, e anche lo stesso Wittgenstein in seguito l’avrebbe ritenuta tale. Una conclusione migliore sarebbe stata: «Su ciò che non possiamo

conoscere, possiamo comunque esercitare la nostra immaginazione». In fin dei conti, è proprio raccontando storie che abbiamo iniziato il nostro viaggio per scoprire quello che oggi conosciamo.

Quel viaggio è sempre stato guidato da ciò che non sappiamo. Come dichiarò Maxwell: «L'ignoranza consapevole di essere tale è il preludio a ogni reale progresso nella scienza». Penso che questa affermazione sia senz'altro vera in riferimento alla matematica: se voglio mantenere la mia fede mentre mi avventuro nell'ignoto, devo credere che ci sia una soluzione e che io possa trovarla. La consapevolezza di non sapere è cruciale per fare progressi. Stephen Hawking si rende conto del pericolo di credere di sapere tutto: «Il più grande nemico della conoscenza non è l'ignoranza, ma l'illusione di sapere».

Per me, le congetture – le cose che non abbiamo ancora dimostrato – sono la linfa vitale della matematica. Sono le cose che non conosco a spingermi a portare avanti la mia ricerca. Voglio sapere se l'ipotesi di Riemann è vera e se la congettura PORC, a cui ho dedicato gli ultimi decenni, è falsa. Per citare le parole di Jacob Bronowski: «La conoscenza umana è personale e responsabile, un'avventura senza fine ai confini dell'incertezza».

L'importanza della destinazione non ancora raggiunta è illustrata dalla strana reazione di molti matematici quando un grande teorema viene infine dimostrato: come proviamo un senso di tristezza quando arriviamo alla fine di un grande romanzo, allo stesso modo la chiusura di una ricerca matematica può essere accompagnata da un certo senso di malinconia. Penso che amassimo a tal punto la sfida delle equazioni di Fermat che, quando Andrew Wiles ha infine risolto questo enigma vecchio 350 anni, assieme all'euforia c'era anche un senso di depressione.

È importante accettare il fatto che dobbiamo convivere con l'incertezza, con l'ignoto, con l'inconoscibile. Anche se riuscissimo infine a produrre una teoria che descriva il funzionamento dell'universo, non potremo mai essere certi che non ci sia un altro capitolo della storia che attenda solo di

essere scoperto. Non possiamo mai sapere se siamo giunti alla fine della storia. Per quanto possiamo desiderare ardentemente la certezza, per fare scienza dobbiamo essere sempre pronti ad andare avanti, lasciandoci alle spalle le storie che raccontiamo oggi. Ma è proprio per questo che la scienza è viva e non si fossilizzerà mai.

Così, forse, è importante che io abbracci l'incertezza del futuro del mio dado da casinò mentre mi preparo a lanciarlo. E dopo che è caduto dal mio palmo, magari è proprio il fatto di non sapere come atterrerà a spingermi a non perderlo di vista mentre tocca il tavolo e inizia a rotolare.

Ringraziamenti

I miei sentiti ringraziamenti vanno alle persone che hanno contribuito a rendere possibile la realizzazione di questo libro:

La mia editor a 4th Estate: Louise Haines.

Il mio agente alla Green and Heaton: Antony Topping.

La mia assistant editor: Sarah Thickett.

La mia illustratrice: Joy Gosney.

I miei revisori e correttori: Eddie Mizzi, Jan McCann, Stephen Guise.

I miei lettori: Andreas Brandhuber, Joseph Conlon, Pedro Ferreira, Chris Lintott, Dan Segal e Christiane Timmel.

Le persone che ho intervistato: Bob May, Melissa Franklin, John Polkinghorne, John Barrow, Roger Penrose e Christof Koch.

I miei datori di lavoro: The Mathematical Institute, The Department of Continuing Education, New College, l'Università di Oxford.

Il mio mecenate: Charles Simonyi.

La mia famiglia: Shani, Tomer, Magaly e Ina.

Note

Confine zero: le incognite note

1. Aristotele, *Metafisica*, traduzione a cura di Antonio Russo, Laterza, Bari 1971.

Capitolo 1

1. Tom Stoppard, *Arcadia*, atto I, scena 4, trad. it. di Alessandra Serra e Anna Parnanzini, Einaudi, Torino 1993.
2. Agostino, *La città di Dio*, trad. e cura di Carlo Carena, Einaudi-Gallimard, Torino e Parigi 1992, p. 201.
3. Blaise Pascal, *Pensieri*, trad. it. a cura di Paolo Serini, Mondadori, Milano 1968, frammento 168, pp. 55-56.

Capitolo 2

1. Jules-Henri Poincaré, *Scienza e metodo*, a cura di Claudio Bartocci, Einaudi, Torino 1997, p. 15.
2. Tom Stoppard, *Arcadia*, atto I, scena 4, cit.
3. Fernand Braudel, *Storia, misura del mondo*, trad. it. di Graziella Zattoni Nesi, il Mulino, Bologna 1998, p. 41 e 44.

Capitolo 9

1. Salman Rushdie, *I figli della mezzanotte*, trad. it. di Ettore Capriolo, Garzanti, Milano 1984.

Capitolo 10

1. Alan Lightman, *I sogni di Einstein*, trad. it. di Cristina Prasso, Guanda, Parma 1993, p. 49.

Capitolo 13

1. I cracker di Natale sono gadget natalizi tradizionali del Regno Unito e dell'Irlanda, consistenti in un tubo di cartone avvolto in una carta dai colori brillanti. Tirandone le estremità, il cracker si spezza emettendo un piccolo botto (da cui il nome cracker); al loro interno possono contenere diverse piccole sorprese. (*N.d.T.*)

Crediti delle illustrazioni

Tutte le illustrazioni sono di Joy Gosney, a eccezione delle seguenti:

Primo Confine: il dado da casinò

1 Piramide di dadi © Raymond Turvey

2 Traiettoria caotica. Realizzata usando «Restricted Three-Body Problemin a Plane», Wolfram Demonstrations Project: http://demonstrations.wolfram.com/RestrictedThreeBodyProblemInAPlane/

3 Albero evolutivo frattale. Adattamento delle immagini generate da One Zoom Tree of Life Explorer: http://www.onezoom.org/index.htm

4 Campi magnetici © Joe McLaren

5 Quattro grafici che descrivono il comportamento del dado. Adattamento da M. Kapitaniak, J. Strzalko, J. Grabski and T. Kapitaniak, *The three-dimensional dynamics of the die throw*, «Chaos» 22(4), 2012

Secondo Confine: il violoncello

1 Atomi all'interno di un dado. Yikrazuul / Wikimedia Commons / Pubblico dominio

2 *Les Atomes* di Jean Baptiste Perrin. J.B. Perrin (disegno svg di MiraiWarren) / Pubblico dominio

Terzo Confine: il barattolo dell'uranio

1 Grafico ristampato per gentile concessione della American Physical Society, da C.G. Shull, *Single-Slit Diffraction of Neutrons*, «Physical Review», 179, 752, 1969. Copyright 1969 American Physical Society: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.179.752

Quinto Confine: l'orologio da polso

1 Entropia. Adattamento di un'illustrazione di Roger Penrose, *The Emperor's New Mind: Concerning Compurets, Minds, and the Laws of Physics*, oup, 1989 (trad. it. *La mente nuova dell'imperatore*, Rizzoli, 1992)

2 Diagramma CCC © Roger Penrose, *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe*, Bodley Head, 2010 (trad. it. *Dal Big Bang all'eternità: I cicli temporali che danno forma all'universo*, Rizzoli, 2011)

Sesto Confine: il chatterbot

1 Disegno di un neurone. Riprodotta per gentile concessione di Santiago Ramón y Cajal, Lascito Cajal, Instituto Cajal, Madrid

2 Purezza di Randall Munroe, xkcd.com: http://xkcd.com/435/

3 Veglia / Sonno profondo. Illustrazione basata su immagini tratte da Marcello Massimini, Fabio Ferrarelli, Reto Huber, Steve K. Esser, Harpreet Singh, Giulio Tononi, *Breakdown of Cortical Effective Connectivity During Sleep*, «Science» 309, pp. 2228-2232, 2005

4 Due immagini di reti a 8 nodi. Riprodotte per gentile concessione degli autori. Giulio Tononi e Olaf Sporns, *Measuring information integration*, «BMC Neuroscience» 4, 2003

Autore e editore hanno compiuto ogni ragionevole sforzo per rintracciare i proprietari di copyright delle immagini e del materiale riportati in questo libro, e restano a disposizione degli aventi diritto che non sono riusciti a rintracciare.

Altre letture

AL-KHALILI, JIM, *Quantum: A Guide for the Perplexed*, Weidenfeld & Nicolson, 2003 (trad. it. *La fisica dei perplessi: l'incredibile mondo dei quanti*, Bollati Boringhieri, 2014).

and Imagination in Philosophical Investigations, SS243–315, Clarendon Press, 2006.

ARMSTRONG, KAREN, *A Short History of Myth,* Canongate, 2005.

–, *The Case for God,* Bodley Head, 2009.

–, *The Great Transformation: The World in the Time of Buddha, Socrates, Confucius and Jeremiah*, Atlantic Books, 2006.

AYER, A.J., *Language, Truth and Logic*, Victor Gollancz, 1936 (trad. it. *Linguaggio, verità e logica*, Feltrinelli, 1961).

–, *The Problem of Knowledge*, Penguin Books, 1956 (trad. it. *Il problema della conoscenza*, La Nuova Italia, 1967).

BAGGINI, JULIAN, *Atheism: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2003.

BAGGOTT, JIM, *Farewell to Reality: How Fairytale Physics Betrays the Search for Scientific Truth*, Constable, 2013.

BARBOUR, JULIAN, *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, Oxford University Press, 1999 (trad. it. *La fine del tempo. La rivoluzione fisica prossima ventura*, Einaudi, 2003).

BARROW, JOHN, *Impossibility: The Limits of Science and the Science of Limits*, Oxford University Press, 1998 (trad. it. *Impossibilità: I limiti della scienza e la scienza dei limiti*, Rizzoli, 1999).

–, *The Constants of Nature*, Jonathan Cape, 2002 (trad. it. *I numeri dell'universo: Le costanti di natura e la teoria del tutto*, Mondadori, 2003).

BARROW-GREEN, June, *Poincaré and the Three-Body Problem*, American Mathematical Society, 1997.

BAYNE, TIM, *The Unity of Consciousness*, Oxford University Press, 2010.

BLACKBURN, SIMON, *Truth: A Guide for the Perplexed*, Allen Lane, 2005.

BLACKMORE, SUSAN, *Consciousness: An Introduction*, Hodder & Stoughton, 2003 (trad. it. *Coscienza*, Codice, 2007).

–, *Conversations on Consciousness*, Oxford University Press, 2005.

BONDI, HERMANN, *Relativity and Common Sense: A New Approach to Einstein*, Doubleday, 1964 (trad. it. *La relatività e il senso comune: Nuova introduzione alle idee di Einstein*, Zanichelli, 1965).

BORGES, JORGE LUIS, *Labyrinths: Selected Stories and Other Writings*, New Directions, 1962.

BUTTERWORTH, JON, *Smashing Physics: Inside the World's Biggest Experiment*, Headline, 2014.

CARROLL, SEAN, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Oneworld Publications, 2011 (trad. it. *Dall'eternità a qui: La ricerca della teoria ultima del tempo*, Adelphi, 2011).

CLOSE, FRANK, *Particle Physics: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2004.

–, *The Infinity Puzzle: Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe*, Oxford University Press, 2013 (trad. it. *L'enigma dell'infinito: Alla ricerca del vero universo*, Einaudi, 2013).

CONLON, JOSEPH, *Why String Theory?*, CRC Press, 2016.

COX, BRIAN E FORSHAW, JEFF, *Why Does $E=mc^2$? (And Why Should We Care?)*, Da Capo Press, 2009 (trad. it. *Perché $E=mc^2$? E perché dovrebbe interessarci?*, Hoepli, 2013).

DAWKINS, RICHARD, *The Blind Watchmaker*, Longman, 1986 (trad. it. *L'orologiaio cieco*, Rizzoli, 1988).

–, *The God Delusion*, Bantam Press, 2006 (trad. it. *L'illusione di Dio*, Mondadori, 2007).

DENNETT, DANIEL, *Consciousness Explained*, Little, Brown, 1991 (trad. it. *Coscienza*, Rizzoli, 1993).

DEUTSCH, DAVID, *The Fabric of Reality*, Allen Lane, 1997 (trad. it. *La trama della realtà*, Einaudi, 1997).

DIXON, THOMAS, *Science and Religion: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2008 (trad. it. *Scienza e religione*, Codice, 2009).

DU SAUTOY, MARCUS, *Finding Moonshine*, Fourth Estate, 2008 (trad. it. *Il disordine perfetto*, Rizzoli, 2007).

–, *The Music of the Primes*, Fourth Estate, 2003 (trad. it. *L'enigma dei numeri primi*, Rizzoli, 2004).

–, *The Number Mysteries*, Fourth Estate, 2010 (trad. it. *L'equazione da un milione di dollari e altri enigmi matematici che rifiutano di lasciarsi risolvere*, Rizzoli, 2010).

EDELMAN, GERALD E TONONI, GIULIO, *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*, Basic Books, 2000 (trad. it. *Un universo di coscienza: Come la materia diventa immaginazione*, Einaudi, 2000).

FERREIRA, PEDRO, *The Perfect Theory: A Century of Geniuses and the Battle over General Relativity*, Little Brown, 2014 (trad. it. *La teoria perfetta. La relatività generale: un'avventura lunga un secolo*, Rizzoli, 2014).

–, *The State of the Universe. A Primer in Modern Cosmology*, Weidenfeld & Nicolson, 2006.

FEYNMAN, RICHARD, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, 1964. Disponibile in lingua originale sul sito http://feynmanlectures.caltech.edu/

(trad. it. *La fisica di Feynman*, Zanichelli, 1964).

GAMOW, GEORGE, *Mr Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, 1965 (trad. it. *Le avventure di Mr. Tompkins: Viaggio scientificamente fantastico nel mondo della fisica*, Dedalo, 1995).

GLEICK, JAMES, *Chaos: The Amazing Science of the Unpredictable*, Heinemann, 1988 (trad. it. *Caos*, Sansoni, 1997).

GOLDSTEIN, REBECCA, *36 Arguments for the Existence of God*, Atlantic Books, 2010.

GREENE, BRIAN, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999 (trad. it. *L'universo elegante: Superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima*, Einaudi, 2003).

–, *The Fabric of the Cosmos*, Knopf, 2004 (trad. it. *La trama del cosmo*, Einaudi, 2004).

–, *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*, Knopf, 2011 (trad. it. *La realtà nascosta: Universi paralleli e le leggi profonde del cosmo*, Einaudi, 2012).

GUTH, ALAN, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Addison-Wesley, 1997.

HAWKING, STEPHEN, *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*, Bantam, 1988 (trad. it. *Dal Big Bang ai buchi neri: Breve storia del tempo*, Rizzoli, 1997).

KAKU, MICHIO, *Hyperspace: A Scientific Odyssey Through the 10*th *Dimension*, Oxford University Press, 1994 (trad. it., *Iperspazio: Un viaggio scientifico attraverso gli universi paralleli, le distorsioni del tempo e la decima dimensione*, Macro, 2002).

KAPITANIAK, M., STRZALKO, J., GRABSKI J. E KAPITANIAK, T., *The threedimensional dynamics of the die throw*, «Chaos» 22 (4), 2012.

KOCH, CHRISTOF, *Consciousness: Confessions of a Romantic Reductionist*, MIT Press, 2012 (trad. it. *Una coscienza: Confessioni di uno scienziato romantico*, Codice, 2013).

–, *The Quest for Consciousness: A Neurobiological Approach*, Roberts & Company, 2004 (trad. it. *Alla ricerca della coscienza: Una prospettiva neurobiologica*, UTET, 2004).

KRAUSS, LAWRENCE, *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather Than Nothing*, Free Press, 2012 (trad. it. *L'universo dal nulla: Le rivoluzionarie scoperte che hanno cambiato le nostre basi scientifiche*, Macro, 2013).

KURZWEIL, RAY, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking, 2005 (trad. it. *La singolarità è vicina*, Apogeo, 2008).

–, *How to Create a Mind: The Secrets of Human Thought Revealed*, Viking, 2012 (trad. it., *Come creare una mente: I segreti del pensiero umano*, Apogeo Next, 2013).

LAKATOS, IMRE, *Proofs and Refutations: The Logic of Mathematical Discovery*, Cambridge University Press, 1976 (trad. it. *Dimostrazioni e confutazioni: La logica della scoperta matematica*, Feltrinelli, 1979).

LASKAR, JACQUES E GASTINEAU, MICKAEL, *Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth*, «Nature» 459, pp. 817-819, 2009.

LEVIN, JANNA, *How the Universe Got Its Spots: Diary of a Finite Time in a Finite Space*, Princeton University Press, 2002 (trad. it. *Come all'universo sono venute le macchie*, il Saggiatore, 2003).

LIGHTMAN, ALAN, *Einstein's Dreams*, First Warner Books, 1994 (trad. it. *I sogni di Einstein*, Guanda, 1993).

LIVIO, MARIO, *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant and the Beauty of the Cosmos*, John Wiley & Sons, 2000 (trad. it. *La bellezza imperfetta del cosmo*, UTET, 2003).

MADDOX, JOHN, *What Remains to be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life and the Future of the Human Race*, Free Press, 1998 (trad. it. *Che cosa resta da scoprire: Una mappa dei segreti delle origini della vita e del futuro della razza umana*, Garzanti, 2000).

MAY, ROBERT M., *Simple mathematical models with very complicated dynamics*, «Nature» 261, pp. 459-467, 1976.

MCCABE, HERBERT, *God Still Matters*, Continuum Books, 2002.

MONK, RAY, *Ludwig Wittgenstein: The Duty of Genius*, Jonathan Cape, 1990 (trad. it., *Ludwig Wittgenstein: Il dovere del genio*, Bompiani, 1991).

MULHALL, STEPHEN, *The Great Riddle: Wittgenstein and Nonsense, Theology and Philosophy*, Oxford University Press, 2015.

–, *Wittgenstein's Private Language: Grammar, Nonsense* Nagel, Jennifer, *Knowledge: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2014.

PENROSE, ROGER, *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe*, Bodley Head, 2010 (trad. it. *Dal Big Bang all'eternità: I cicli temporali che danno forma all'universo*, Rizzoli, 2011).

–, *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, Oxford University Press, 1989 (trad. it. *La mente nuova dell'imperatore*, Rizzoli, 1992).

–, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Jonathan Cape, 2004 (trad. it. *La strada che porta alla realtà: Le leggi fondamentali dell'universo*, Rizzoli, 2007).

PETERSON, IVARS, *Newton's Clock: Chaos in the Solar System*, Freeman, 1993.

POINCARÉ, HENRI, *Science and Method*, Thomas Nelson, 1914 (trad. it. *Scienza e metodo*, Einaudi, 1997).

POLKINGHORNE, JOHN, *Belief in God in an Age of Science*, Yale University Press, 1998 (trad. it. *Credere in Dio nell'età della scienza*, Cortina, 2000).

–, *Quantum Physics and Theology: An Unexpected Kinship*, SPCK, 2007.

–, *Quantum Theory: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2002 (trad. it. *Teoria dei quanti*, Codice, 2007).

RAMACHANDRAN, V.S., *A Brief Tour of Human Consciousness: From Impostor Poodles to Purple Numbers*, Pi Press, 2004.

RANDALL, LISA, *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World*, Bodley Head, 2011

(trad. it. *Bussando alle porte del cielo: L'universo come non l'abbiamo mai conosciuto*, il Saggiatore, 2012).

REES, MARTIN, *From Here to Infinity: Scientific Horizons*, Profile Books, 2011 (trad. it. *Da qui all'infinito: Una riflessione sul futuro della scienza*, Codice, 2012).

–, *Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe*, Weidenfeld & Nicolson, 1999 (trad. it. *I sei numeri dell'universo: Le forze profonde che spiegano il cosmo*, Rizzoli, 2002).

SAARI, DONALD E XIA, ZHIHONG, *Off to infinity in finite time*, «Notices of the American Mathematical Society», Vol. 42, n. 5, pp. 538-546, 1995.

SACKS, JONATHAN, *The Great Partnership: God, Science and the Search for Meaning*, Hodder & Stoughton, 2011.

SAMPLE, IAN, *Massive: The Hunt for the God Particle*, Virgin Books, 2010 (trad. it. *Higgs e il suo bosone: La caccia alla particella di Dio*, il Saggiatore, 2013).

SEUNG, SEBASTIAN, *Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are*, Houghton Mifflin Harcourt, 2012 (trad. it. *Connettoma: La nuova geografia della mente*, Codice, 2013).

SILK, JOSEPH, *The Infinite Cosmos: Questions from the Frontiers of Cosmology*, Oxford University Press, 2006.

SINGH, SIMON, *Big Bang: The Most Important Scientific Discovery of All Time and Why You Need to Know About It*, Fourth Estate, 2004 (trad. it. *Big Bang: L'origine dell'universo e gli uomini che ne hanno svelato il mistero*, Rizzoli, 2004).

–, *Fermat's Last Theorem*, Fourth Estate, 1997 (trad. it. *L'ultimo teorema di Fermat*, Rizzoli, 1997).

SMOLIN, LEE, *Time Reborn: From the Crisis of Physics to the Future of the Universe*, Allen Lane, 2013 (trad. it. *La rinascita del tempo: Dalla crisi della fisica al futuro dell'universo*, Einaudi, 2014).

STEANE, ANDREW, *Faithful to Science: The Role of Science in Religion*, Oxford University Press, 2014.

–, *The Wonderful World of Relativity: A Precise Guide for the General Reader*, Oxford University Press, 2011.

STEWART, IAN, *Does God Play Dice? The New Mathematics of Chaos*, Basil Blackwell, 1989 (trad. it. *Dio gioca a dadi*?, Bollati Boringhieri, 1993).

STOPPARD, TOM, *Arcadia*, Faber & Faber, 1993 (trad. it. *Arcadia*, Einaudi, 2003).

SUDBERY, ANTHONY, *Quantum Mechanics and the Particles of Nature: An Outline for Mathematicians*, Cambridge University Press, 1986.

TALEB, NASSIM, *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*, Allen Lane, 2007 (trad. it. *Il cigno nero: Come l'improbabile governa la nostra vita*, il Saggiatore, 2008).

TEGMARK, MAX, *Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*, Knopf, 2014 (trad. it. *L'universo matematico: La ricerca della natura ultima della realtà*, Bollati Boringhieri, 2014).

–, *The Mathematical Universe*, «Found. Phys.» 38: pp. 101-150, 2008.

TONONI, GIULIO E SPORNS, OLAF, *Measuring information integration*, «BMC Neuroscience» 4, 2003.

TONONI, GIULIO, *Consciousness as Integrated Information: A Provisional Manifesto*, «Biol. Bull.» vol. 215 n. 3: 216-242, 2008.

–, *Phi. A Voyage from the Brain to the Soul*, Pantheon, 2012.

WATTS, FRASER E KNIGHT, CHRISTOPHER (a cura di), *God and the Scientist: Exploring the Work of John Polkinghorne*, Ashgate Publishing Limited, 2012.

WEINBERG, STEVEN, *Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature*, Hutchinson Radius, 1993 (trad. it. *Il sogno dell'unità dell'universo*, Mondadori, 1993).

WILLIAMSON, TIMOTHY, *Knowledge and its Limits*, Oxford University Press, 2000.

WOIT, PETER, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Continuing Challenges to Unify the Laws of Physics*, Jonathan Cape, 2006 (trad. it. *Neanche sbagliata: Il fallimento della teoria delle stringhe e la corsa all'unificazione delle leggi della fisica*, Codice, 2007).

YOURGRAU, PALLE, *A World Without Time: The Forgotten Legacy of Gödel and Einstein*, Basic Books, 2005 (trad. it. *Un mondo senza tempo: L'eredità dimenticata di Gödel e Einstein*, il Saggiatore, 2006).

ZEE, ANTHONY, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press, 2003.

Il seguente sito web della Stanford Encyclopaedia of Philosophy presenta moltissimo materiale estremamente interessante: http://plato.stanford.edu.

Indice dei nomi e dei luoghi

Académie des sciences [1]
Accademia di Berlino [1]
Accademia reale delle scienze di Parigi [1]
Accademia reale svedese delle scienze [1]
Adams, John Couch [1]
Agenzia spaziale europea [1]
Agostino di Ippona [1], [2], [3], [4]
Alhazen [1]
Allen Institute for Brain Science [1], [2]
Allen, Paul G. [1]
Allen, Woody [1]
al-Sufi [1]
American Association for Advancement of Science [1]
Amiot, Lawrence [1]
Anderson, Carl [1], [2]
Aniston, Jennifer [1], [2]-[3], [4], [5]
Arago, François [1]
Aristarco di Samo [1], [2]
Aristotele [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]-[11], [12]
Armstrong, Karen [1], [2]
Bach, Johann Sebastian [1], [2], [3], [4]
Bacon, Francis [1]
Banca d'Inghilterra [1]
Barbour, Julian [1]
Barrow, John [1]-[2], [3], [4]
BBC [1], [2]
Bell, John [1], [2], [3], [4]

Berger, Hans [1]
Berkeley, George [1]
Bessel, Friedrich [1], [2]
Besso, Michele [1]
Blair, Tony [1]
Bohr, Niels [1], [2], [3], [4], [5], [6]
Boltzmann, Ludwig [1], [2]
Bombelli, Rafael [1]
Borges, Jorge Luis [1]
Boyle, Robert [1], [2]
Bradwardine, Thomas [1]
Brady, Nicholas [1]
Brahmagupta [1]
Braudel, Fernand [1], [2]
British Association of Science [1]
Broca, Paul [1], [2]
Bronowski, Jacob [1], [2]
Brown, Robert [1], [2]
Bruno, Giordano [1], [2], [3]
Caltech [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]
Camera dei Lord [1], [2]
Candelas, Philip [1]
Cantor, Georg [1], [2]-[3], [4]
Cardano, Girolamo [1]-[2], [3]
Carrey, Jim [1]
Carrol, Sean [1]
Cartesio (René Descartes) [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]
Cassini, Giovanni [1]
Castro, Patricía [1]
Center for Sleep and Consciousness (Università del Wisconsin) [1]
CERN [1], [2], [3], [4], [5], [6]
Chadwick, James [1], [2]
Chalmers, David [1], [2]
Chandrasekhar, Subrahmanyan [1]
Chomsky, Noam [1]
Church, Alonso [1]
Clairaut, Alexis [1]
Cohen, Paul [1], [2]

Comte, Auguste [1], [2], [3], [4], [5]

Connes, Alain [1], [2]

Coulson, Charles [1]

Crick, Francis [1], [2]

Curtis, Herbert [1]

Cusano, Nicola [1]

d'Oresme, Nicola [1], [2], [3], [4], [5]-[6]

da Vinci, Leonardo [1]

Dalai Lama [1], [2]

Dalton, John [1]

Darboux, Gaston [1]

Dawkins, Richard [1], [2], [3], [4], [5]

De la Rue, Warren [1]

Dennett, Daniel [1]

Diofanto [1], [2]

Dirac, Paul [1], [2]

Douspis, Marian [1]

Du Bois-Reymond, Emil [1], [2]

Eddington, Arthur [1], [2], [3]

Ehrsson, Henrik [1]-[2]

Einstein, Albert [1], [2]-[3], [4], [5], [6], [7], [8]-[9], [10]-[11], [12], [13], [14], [15], [16]-[17], [18], [19]-[20], [21], [22], [23], [24], [25]-[26], [27]-[28], [29], [30], [31]

Elkies, Noam [1]

Erdős, Paul [1]

Erone di Alessandria [1]

Euclide [1], [2]-[3], [4], [5]

Eulero, Leonardo [1], [2]

Euripide [1]

Everett, Hugh [1]

Fermat, Pierre de [1], [2], [3]-[4], [5], [6], [7], [8]-[9], [10], [11]

Fermi, Enrico [1]

Fermilab [1]

Ferreira, Pedro [1], [2]

Festival della scienza di Roma [1]

Feynman, Richard [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]

Fitch, Frederic [1]

Flanagan, Owen [1]

Fondazione Templeton [1], [2]
Fontana, Niccolò (Tartaglia) [1]-[2]
Fourier, Joseph [1]
Franklin, Melissa [1]-[2], [3], [4]
Franklin, W.S. [1]
Galilei, Galileo [1]
Galle, Johann Gottfried [1], [2]
Gallup, Gordon [1], [2]
Gamow, George [1], [2]
Gardner, Martin [1]
Gastineau, Mickaël [1], [2]
Gauss, Carl Friedrich [1]
Geiger, Hans [1], [2]
Gell-Mann, Murray [1], [2], [3], [4], [5]-[6], [7], [8]
Gettier, Edmund [1]
Giorgio III [1]
Gödel, Kurt [1], [2], [3], [4]-[5], [6], [7]-[8], [9]
Gombaud, Antoine [1]
Gordon, Carolyn [1]
Gordon, Walter [1]
Gould, Stephen Jay [1]
Grabski, Juliusz [1]
Gregory, James [1], [2]
Griščuk, Leonid [1]
Guth, Alan [1]
Haldane, Andrew [1]
Halley, Edmond [1]
Harrington, Leo [1]
Harvard College Observatory [1]
Hawking, Stephen [1], [2], [3], [4], [5]-[6], [7], [8], [9]-[10], [11], [12], [13], [14]
Haynes, John-Dylan [1]-[2]
Heisenberg, Werner [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]-[8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]
Herschel, Friedrich Wilhelm [1]-[2], [3]
Hertz, Heinrich [1]
Higman, Graham [1], [2]
Hilbert, David [1]-[2], [3]-[4], [5], [6]
Hubble, Edwin [1], [2], [3], [4], [5]

Hume, David [1]
Hyatt, John Wesley [1]
IDF (Forze di difesa israeliane) [1]
Imperial College [1]
Ingenhousz, Jan [1]
Innes, Robert [1]
Ippaso [1]
Jackson, Michael [1]
Jaynes, Julian [1]
Joyce, James [1]
Kak, Mark [1]
Kant, Immanuel [1], [2], [3], [4], [5]
Kapitaniak, Marcin [1]
Kapitaniak, Tomasz [1]
Karolinska Institutet [1], [2]
Kelvin, Lord [1]-[2]
Kennard, Earle [1]
Keplero [1], [2], [3]
Khayyam, Umar [1]
King's College [1]
Klein, Oskar [1]
Koch, Christof [1]-[2], [3], [4]-[5], [6], [7], [8]
Kronecker, Leopold [1], [2]
Kurzweil, Ray [1], [2]
Lakatos, Imre [1]
Lamb, Willis [1]
Lambert, Johann Heinrich [1]
Laplace, Pierre-Simon [1], [2], [3], [4]-[5], [6], [7], [8]
Laskar, Jacques [1], [2]
Le Verrier, Urbain [1], [2]
Leavitt, Henrietta [1]-[2]
Lecoq de Boisbaudran, Paul-Émile [1]
Leibniz, Gottfried [1], [2], [3]
Lemaître, Georges [1], [2], [3]
Lightman, Alan [1]
Linde, Andrej [1]
Lippershey, Hans [1]
Lloyd, Seth [1]

Lorenz, Edward [1]-[2]
Lucas, John [1], [2]
Luigi XI [1]
Luminet, Jean-Pierre [1]
Lyapunov, Aleksandr [1]
Mach, Ernst [1], [2]
Madre Teresa di Calcutta [1]
Major, John [1]
Marino, Lori [1]
Markram, Henry [1]
Max-Planck-Institut [1]
Maxwell, James Clerk [1], [2], [3], [4], [5]
May, Robert [1]-[2], [3], [4], [5]
McCabe, Herbert [1], [2]
Mendeleev, Dmitrij [1]-[2], [3], [4], [5]
Mermin, David [1], [2]
Messiaen, Olivier [1]
Metallica [1]
Michelson, Albert Abraham [1], [2], [3], [4], [5]
Miller, Jonathan [1]
Millikan, Robert Andrews [1]
Minkowski, Hermann [1], [2], [3]
MIT [1]
Mitchell, John [1]
Mittag-Leffler, Gösta [1], [2], [3], [4]
Mora, Patricia [1]
Morley, Edward [1], [2], [3], [4]
Mozart, Wolfgang Amadeus [1], [2]
National Physical Laboratory [1]
National Theatre (Londra) [1]
Navier, Claude-Louis [1]
Ne'eman, Yuval [1], [2]
Neddermeyer, Seth [1]
New College [1], [2]
Newlands, John [1]
Newton, Isaac [1], [2], [3]-[4], [5]-[6], [7], [8]-[9], [10], [11]-[12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]-[25], [26], [27], [28], [29]
Nishijima, Kazuhiko [1]

Omero [1]
Oppenheimer, Robert [1]
Oscar II [1]-[2]
Osservatorio di Berlino [1]
Osservatorio di Parigi [1], [2]
Osservatorio Sphinx [1], [2]
Owen, Adrian [1], [2]
Oxford Philosophical Society [1]
Pais, Abraham [1]
Paris, Jeff [1]
Parkinson's UK Brain Bank [1], [2]
Pascal, Blaise [1]-[2], [3], [4], [5], [6]
Penrose, Roger [1], [2]-[3], [4]-[5], [6], [7]
Pepys, Samuel [1]
Perel'man, Grigorij [1]
Perrin, Jean Baptiste [1]
Pitagora [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]
Planck, Max [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]
Platone [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]
Podolsky, Boris [1]
Poincaré, Henri [1], [2], [3]-[4], [5], [6], [7]
Poisson, Siméon-Denis [1]
Politecnico di Zurigo [1]
Polkinghorne, John [1]-[2], [3]-[4], [5], [6], [7], [8], [9]
Popper, Karl [1], [2], [3]
Preskill, John [1]
Prokof'ev, Sergej [1], [2], [3], [4]
Purcell, Henry [1]
Rabi, Isidor [1]
Ramón y Cajal, Santiago [1], [2], [3]
Rees, Martin [1]
Reiss, Diana [1]
Riemann, Bernhard [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]
Robertson, Howard [1]
Robinson, Julia [1]
Rømer, Ole [1]
Rosen, Nathan [1]
Rovelli, Carlo [1], [2]

Royal Observatory [1]
Royal Society [1], [2]
Rufo di Efeso [1]
Rumsfeld, Donald [1], [2]
Rushdie, Salman [1], [2]
Russell, Bertrand [1], [2], [3]
Rutherford, Ernest [1]-[2], [3], [4]
Sagan, Carl [1]
Sartre, Jean-Paul [1]
Schrödinger, Erwin [1], [2], [3], [4], [5]
Schumacher, Heinrich Christian [1]
Searle, John [1]
Serber, Robert [1], [2], [3]
Shakespeare, William [1], [2]
Shapely, Harlow [1]
Shull, Clifford [1], [2]
Smithsonian Museum of Natural History [1]
Socrate [1]
Sofocle [1]
Stanford Linear Accelerator Center [1]
Stokes, George Gabriel [1]
Stoppard, Tom [1], [2]
Strzalko, Jaroslaw [1]
Taleb, Nassim [1]
Talete di Mileto [1], [2]
Tegmark, Max [1], [2]
Templeton, Sir John [1], [2]
The Department of Continuing Education [1]
The Mathematical Institute [1]
Thomson, Joseph John [1], [2]-[3], [4], [5]
Thorne, Kip [1], [2]
Tito Lucrezio Caro [1]
Tolkien, John [1]
Tommaso d'Aquino [1], [2], [3]
Tononi, Giulio [1], [2]-[3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]
Tufts University [1]
Turing, Alan [1], [2], [3], [4]
UCL (University College London) [1]

Università del Maryland [1]
Università dell'Hertfordshire [1]
Università della California [1]
Università di Berlino [1]
Università di Cambridge [1], [2], [3], [4], [5]
Università di Halle [1]
Università di Oxford [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]
Università di Stanford [1], [2]
Università di Uppsala [1]
Vilenkin, Alexander [1]
Villard, Paul [1]
von Foerster, Heinz [1]
Wallis, John [1], [2]
Weil, André [1]
Well, David [1]
Wernicke, Carl [1]
Wheeler, John [1]
Wigner, Eugene [1]
Wiles, Andrew [1], [2], [3], [4]
Williamson, Timothy [1], [2]
Wiseman, Richard [1]
Wittgenstein, Ludwig [1]-[2], [3], [4]
Wolpert, Scott [1]
Woodin, Hugh [1]
Wright, Thomas [1]
Xia, Zhihong [1], [2]
Yajnavalkya [1]
Yorke, Jim [1], [2]
Young, Thomas [1]-[2], [3], [4], [5], [6]
Zel'dovič, Jakov [1]
Zenone di Elea [1], [2]
Žižek, Slavoj [1]
Zweig, George [1]

Indice

Confine zero: le incognite note

PRIMO CONFINE: IL DADO DA CASINÒ

- Capitolo 1
- Capitolo 2

SECONDO CONFINE: IL VIOLONCELLO

- Capitolo 3
- Capitolo 4

TERZO CONFINE: IL BARATTOLO DELL'URANIO

- Capitolo 5
- Capitolo 6

QUARTO CONFINE: L'UNIVERSO RITAGLIATO

- Capitolo 7
- Capitolo 8

QUINTO CONFINE: L'OROLOGIO DA POLSO

- Capitolo 9
- Capitolo 10

SESTO CONFINE: IL CHATTERBOT

- Capitolo 11
- Capitolo 12

SETTIMO CONFINE: IL CRACKER NATALIZIO

- Capitolo 13
- Capitolo 14

Ringraziamenti

Note

Crediti delle illustrazioni

Altre letture

Indice dei nomi e dei luoghi